





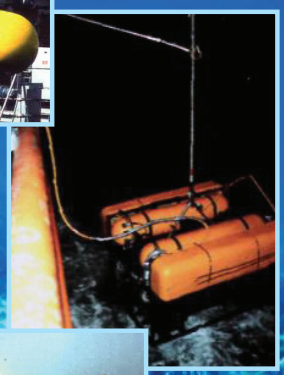
К. С. Трунин

ГИБКИЕ СВЯЗИ В МОРСКИХ ПРИВЯЗНЫХ СИСТЕМАХ

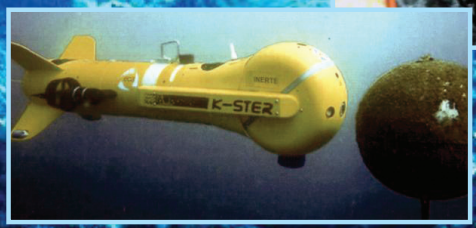












МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Национальный университет кораблестроения
имени адмирала Макарова

К. С. Трунин

ГИБКИЕ СВЯЗИ В МОРСКИХ ПРИВЯЗНЫХ СИСТЕМАХ

МОНОГРАФИЯ

Николаев
Издатель Торубара В. В.
2019

УДК 629.5.28:626.76
ББК 39.42-04
Т78

Рекомендовано Учёным Советом Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова к печати, выписка из протокола №1 от 26.01.2018 г.

Рецензенти: *В. С. Блинцов*, д.т.н., профессор;

А. Я. Казарезов, д.т.н., профессор (Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова);

В. М. Косенков, к.т.н., ст. научн. сотр. (ИИПТ НАНУ)

Трунин К. С.

Т78 Гибкие связи в морских привязных системах : Монография / К. С. Трунин. — Николаев : издатель Торубара В. В., 2019. — 536 с.

ISBN 978-617-7472-28-4

В монографии представлено использование гибких связей в морских привязных системах от их появления до наших дней. Рассмотрены различные режимы эксплуатации морских привязных систем, приведена их классификация, рассмотрены математические модели динамики.

Разработаны математическая модель статики и динамики гибких связей (ГС) в составе морских привязных систем (МПС), алгоритм моделирования динамики ГС, компьютерная программа, описывающая динамику морской привязной системы, позволяющая определять параметры ГС и МПС.

Предназначена для студентов и аспирантов, а также для специалистов, связанных с использованием и проектированием МПС с ГС.

УДК 629.5.28:626.76
ББК 39.42-04

ISBN 978-617-7472-28-4

© Трунин К. С., 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

1. ГИБКИЕ СВЯЗИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА 9

1.1. Понятие гибкой связи. Виды гибких связей. 9
1.2. Появление гибких связей в жизни человека. Исторический очерк 10
1.3. Использование гибких связей в хозяйственной деятельности человека. 18
1.3.1. Гибкие связи из растительных волокон 19
1.3.2. Стальные гибкие связи. 62
1.3.3. Комбинированные гибкие связи 76
1.3.4. Гибкие связи из искусственных волокон и материалов 89
1.4. Применение гибких связей в морском деле 98
1.4.1. Появление гибких связей на флоте 98
1.4.2. Применение гибких связей на флоте 103
Выводы по 1 разделу 137

2. МОРСКИЕ ПРИВЯЗНЫЕ СИСТЕМЫ 138

2.1. Классификация и состав морских привязных систем. 138
2.2. Техническое обеспечение глубоководных исследований с помощью морских привязных систем с гибкими связями. 145
2.3. Подводные привязные и буксируемые системы 147
2.4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований морских привязных систем 155
2.5. Классификация режимов эксплуатации морских привязных систем на примере подводных буксируемых систем 160
2.6. Эксплуатационные задачи морских привязных систем 167
Выводы по Разделу 2 168

3. ГИБКИЕ СВЯЗИ МОРСКИХ ПРИВЯЗНЫХ СИСТЕМ. 177

3.1. Классификация гибких связей, используемых в морских привязных системах 177
3.2. Силы, действующие на гибкие связи в процессе эксплуатации морских привязных систем (на примере подводных буксируемых систем) 182
3.3. Уравнения динамики гибких связей в водной среде в условиях воздействия ветра и морского волнения. 195
3.4. Классификация математических моделей 206
3.5. Математическая модель динамики ГС МПС и МПС с ГС 221

3.6. Компьютерная программа моделирования динамики гибких связей подводных буксируемых систем . . . 285
3.7. Тестирование компьютерной программы моделирования динамики гибких связей подводных буксируемых систем. . . . 297
Выводы по Разделу 3 . . . 312

4. АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИБКИХ СВЯЗЕЙ МОРСКИХ ПРИВЯЗНЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ПОДВОДНЫХ БУКСИРУЕМЫХ СИСТЕМ. . . . 314

4.1. Аварийные режимы работы (функционирования) морских привязных систем. 314
4.2. Классификация аварийных режимов функционирования морских привязных систем. . . . 323
4.3. Примеры аварийных режимов работы МПС . . . 335
4.3.1. Аварийный зацеп гибкой связи за подводное препятствие . . . 343
4.3.2. Столкновение гибкой связи подводной буксируемой системы с подводным объектом посередине гибкой связи . . . 364
4.3.3. Столкновение гибкой связи подводной буксируемой системы с подводным объектом в произвольном месте гибкой связи . . . 376
4.3.4. Аварийный режим торможения судна-носителя подводной буксируемой системы. . . . 388
4.3.5. Режим циркуляции судна-носителя с подводной буксируемой системой. 389
4.3.6. Пространственное движение морских привязных систем на примере буёв нейтральной плавучести . . . 402
Выводы по Разделу 4 . . . 419

5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОРСКИХ ПРИВЯЗНЫХ СИСТЕМ С ГИБКИМИ СВЯЗЯМИ . . . 421

5.1. Теоретические основы проектирования морских привязных систем . . . 421
5.2. Теоретические основы проектирования гибких связей . . . 435
5.3. Проблемы проектирования морских привязных систем. . . . 442
5.4. Совершенствование методов проектирования МПС на основе применения компьютерной программы моделирования динамики МПС с ГС на примере ПБС . . . 446
5.4.1. Расчёты элементов судовых палубных механизмов (СПМ), применяемые при проектировании специальных лебёдок МПС. . . . 451
5.4.2. Буксирные лебёдки . . . 459
5.4.3. Траловые лебёдки. Общие сведения о промысловых устройствах для различных видов лова . . . 465
5.4.4. Спуско-подъёмные устройства и специальные лебёдки для спуска и буксировки ПА. . . . 475
5.4.5. Оценка прочности деталей при проектировании . . . 495
5.5. Рекомендации по расчёту элементов судовых палубных механизмов (СПМ) (специальных лебёдок) МПС. . . . 502
Выводы по Разделу 5 . . . 505

ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . 506
ЛИТЕРАТУРА. . . . 510

ВВЕДЕНИЕ

XX век вошёл в историю человечества не только как век начала завоевания космоса, но и как эпоха завоевания морских глубин, освоения дна океана, его минеральных и химических ресурсов. В XIX и в начале XX веков океанографы ликвидировали целый ряд «белых пятен» и получили информацию о глубинах, течениях, температурах, солёности и других океанографических характеристиках в ранее не изученных частях океана. В экспедициях принимали участие вместе с мореплавателями химики, физики, биологи и другие специалисты. В дальнейшем потребовалось более глубокое изучение физических, химических, гидрометеорологических, биологических и геологических процессов, происходящих в водной среде и в глубинах океанического дна [102].

С развитием производительных сил общества все более расширяется сфера приложения его экономических возможностей, которые распространяются практически на все области освоения ресурсов нашей планеты. Одной из них является Мировой океан, с использованием которого связаны как история многих государств, так и жизненно важные проблемы войны и мира [33].

Мировой океан — водная оболочка земного шара, разделяющая сушу на материки и острова — занимает 70,8% земной поверхности и находится в тесном и непрерывном взаимодействии с атмосферой и земной корой, определяющими его особенности. Как сложнейшая динамическая система Мировой океан является объектом изучения многих наук. Рассматривая Мировой океан как специфическую среду, можно выделить ряд аспектов одной глобальной проблемы «человек и океан». Выделяют три основных аспекта: экономический, военный и политический.

Научное познание Мирового океана началось практически 200 лет тому назад на уровне специальных океанографических экспедиций, кругосветных путешествий и связанных с ними великих географических открытий. Это положило начало описательной науке — океанографии, но водные толщи морей и океанов оставались ещё малоисследованной областью.

В мире существует свыше 150 государств, и лишь немногим более 20 из них не имеют собственного побережья [38]. Почти 90% общего объема морских перевозок приходится на сырье и продовольствие. Масштабность и значение Мирового океана для всех сфер деятельности человека определяются его фундаментальной ролью как источника минеральных, биологических и других стратегических

ресурсов, как главного фактора в глобальных изменениях климата на Земле. Вместе с тем океан и морская среда представляют угрозу как источник опасных катастроф, к которым можно отнести цунами, извержения подводных вулканов, тайфуны и другие явления, влияющие на жизнедеятельность человека и безопасность плавания судов и кораблей, полетов самолетов.

Проблема изучения и хозяйственного освоения Мирового океана приобрела глобальный характер и в ряде морских держав возведена в ранг национальной проблемы номер один. Национализация шельфов, распространение суверенитета приморских государств на ресурсы прибрежных зон, международные соглашения по использованию дна Мирового океана — все это послужило новым стимулом для создания подводной промышленной техники и транспортных средств [29, с. 5].

Авторы И. Б. Иконников, В. М. Гаврилов, Г. В. Пузырев [144] отмечают, что особую значимость приобретает комплекс проблем исследования океана как единой глобальной системы взаимосвязанных физических, химических и других полей. Знание пространственно-временных характеристик этих полей имеет большое народнохозяйственное значение для поиска и подводной добычи полезных ископаемых, для развития рыболовства, климатологии, судоходства. Характеристики указанных полей измеряют с помощью различных технических средств, которые представляют в виде поверхностных, пелагических (в толще воды) и донных средств.

Совершенствование подводной техники даёт возможность пополнить наши знания о морях и океанах, о физических, химических, биологических и геологических процессах, происходящих в их глубинах [156]. Огромное значение для исследования Мирового океана имеют морские привязные системы (МПС), которые включают в себя целый класс подобных систем, имеющих общий элемент — гибкую связь (ГС), в качестве которой выступают канаты и тросы, цепи и кабели, в последнее время — кабель-тросы. Класс МПС весьма многообразен и включает в себя как привязные системы, так и буксируемые, стационарные и др. Однако нас будут интересовать ГС как элемент МПС, которые имеют оригинальную конструкцию и являются величайшим изобретением человечества, без которых невозможна ни одна отрасль человеческой деятельности и, тем более, техники.

Наверное, нет ни одной сферы человеческой деятельности, в которой бы человек не использовал ГС, конструкция которых разнообразна и с каждым годом изменяется и всё более усложняется благодаря появлению новых материалов и технологий. Очевидно, что и в дальнейшем без ГС человечество не сможет обойтись не только при освоении океанских глубин, но и при освоении космоса.

Данная монография и посвящается рассмотрению вопросов использования гибких связей в морском деле. В первом разделе, имеющем название «Гибкие связи и их использование в жизни человека», будут рассмотрены понятие и виды ГС, появление ГС в жизни человека (исторический очерк), использование ГС в хозяйственной деятельности человека, ГС из растительных волокон, стальные и комбинированные ГС, ГС из искусственных волокон и материалов. Однако нас будет больше интересовать вопрос применения ГС в морском деле: появление гибких связей на флоте и их применение.

Во втором разделе, который называется «Морские привязные системы», приведена классификация и состав морских привязных систем, в которых используются гибкие связи, рассмотрен вопрос технического обеспечения глубоководных исследований с помощью морских привязных систем с гибкими связями, подводные привязные и буксируемые системы, результаты теоретических и экспериментальных исследований морских привязных систем. Здесь же приведена классификация режимов эксплуатации морских привязных систем на примере подводных буксируемых систем и эксплуатационные задачи морских привязных систем.

В третьем разделе «Гибкие связи морских привязных систем» приведена классификация гибких связей, используемых в морских привязных системах, силы, действующие на гибкие связи в процессе эксплуатации морских привязных систем (на примере подводных буксируемых систем), уравнения динамики гибких связей в водной среде в условиях воздействия ветра и морского волнения, математическая модель динамики гибких связей морских привязных систем и морских привязных систем с гибкими связями, приведена классификация математических моделей. На основе математической модели динамики гибких связей морских привязных систем создана компьютерная программа моделирования динамики гибких связей подводных буксируемых систем.

В четвёртом разделе, названном «Аварийные режимы функционирования гибких связей морских привязных систем на примере подводных буксируемых систем», рассмотрены аварийные режимы работы (функционирования) морских привязных систем, классификация аварийных режимов функционирования морских привязных систем. Здесь же рассмотрены отдельные примеры аварийных режимов работы: аварийный зацеп гибкой связи за подводное препятствие, столкновение гибкой связи подводной буксируемой системы с подводным объектом посередине гибкой связи, столкновение гибкой связи подводной буксируемой системы с подводным объектом в произвольном месте гибкой связи, режим циркуляции судна-носителя с подводной буксируемой системой.

В пятом разделе, который имеет название «Совершенствование методов проектирования гибких связей морских привязных систем», рассмотрены проблемы проектирования морских привязных систем, теоретические основы проектирования гибких связей морских привязных систем, методы совершенствования проектирования на основе применения математических моделей динамики гибких связей морских привязных систем и морских привязных систем с гибкими связями, а также компьютерной программы описания динамики гибких связей подводных буксируемых систем.

Данная монография является частью диссертационного исследования, в котором ставились следующие задачи:

1) исследование современных проблем создания привязных морских комплексов;
2) создание классификации МПС, ППС, ПБС;
3) создание классификации ГС МПС;
4) уточнение классификации динамических режимов эксплуатации МПС;

5) создание математической модели статики ГС МПС: статика ГС в невозмущённой стратифицированной жидкости; обжатие ГС при погружении; температурное расширение (сжатие) ГС; внешние воздействия на ГС гидрологического происхождения; растяжимость ГС; напряжения изгиба в ГС;

6) создание математической модели динамики ГС МПС: гидродинамическое сопротивление ГС; квазистационарные режимы эксплуатации ГС; динамика ГС;

7) выработка рекомендаций для конструктивной разработки элементов ГС МПС;

8) создание общей математической модели ГС МПС, служащей основой для создания компьютерной программы описания ГС МПС;

9) создание компьютерной программы описания динамики ГС МПС, позволяющая учитывать множество параметров ГС и их изменения в процессе проектирования ГС;

10) разработка инженерных методов расчёта ГС МПС (рекомендаций для проектанта). Компьютерная программа описания динамики ГС МПС позволяет проектанту автоматизировать процесс проектирования МПС.

Автор выражает благодарность своему отцу — Трунину Станиславу Фёдоровичу, который смог пробудить в нём любознательность к данному элементу судовых палубных механизмов и МПС; научному консультанту — Блинцову Владимиру Степановичу, д.т.н., профессору, академику Академии судостроения Украины, — за неоценимую помощь в работе и консультировании в научных исследованиях, без которых этот труд, наверное, просто не состоялся.

Выражаю благодарность рецензенту д.т.н., профессору Казарезову Анатолию Яковлевичу, который нашёл время для прочтения данной монографии, за сделанные ценные замечания, которые позволили улучшить качество данного труда.

Хочу также поблагодарить за ценные замечания, высказанные по описанию математической модели и компьютерной программы ГС МПС к.т.н., старшего научного сотрудника Института импульсных процессов и технологий НАН Украины Косенкова Виктора Михайловича.

1

ГИБКИЕ СВЯЗИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА

На фоне широкого использования различных нитей, волокон, тросов, канатов, цепей и т. п. важным и интересным представляется вопрос их эволюции от появления до наших дней. Ограничимся рассмотрением использования ГС в хозяйственной деятельности человека: сначала рассмотрим виды волокон, из которых изготавливали различные канаты и тросы, процесс изготовления из них ГС, а затем и сами их виды. При этом нас не будут интересовать технология выращивания культуры, болезни и вредители и т.п. В большей степени нас, конечно же, будет интересовать хозяйственное значение и история культуры, из которых производились ГС, и эволюция ГС в морском деле. Проследим путь развития ГС на флоте от их зарождения и до наших дней.

1.1. Понятие гибкой связи. Виды гибких связей

Понятие ГС имеет двоякое толкование. В [206, с. 166] гибкой связью называют элемент расчётной схемы корпуса и надстроек судна, в отличие от жёсткой связи, воспринимающей лишь частично продольное для него усилие от общего изгиба судна или перекрытия. К таким связям относят пластины наружной обшивки, настилов палуб, платформ, второго дна и т.п., которые имеют начальную погибь, вызывающую продольный изгиб при сжатии или растяжении гибкой связи, а также пластины и рёбра жёсткости без погиби, теряющие устойчивость при сжатии.

Многие судовые устройства кроме жестких элементов имеют и податливые элементы, способные при эксплуатации значительно изменять свою форму. Такие элементы называют гибкими связями [172, с. 62]. В некоторых устройствах ГС имеют второстепенное значение, но в большинстве — основное, обуславливая возможность выполнения устройством его назначения. В грузовом устройстве со стрелами весь такелаж представляет собой набор ГС. Есть они и в судовых кранах, спуско-подъемных и шлюпочных устройствах.

Таким образом, имеем два одинаковых термина. Однако в данном случае мы будем подразумевать под *гибкой связью* гибкий элемент (канат, трос, кабель-трос, цепь и т.п.), связывающий отдельные элементы морской привязной системы (МПС) [407], передающий нагрузки и усилия на её элементы и являющийся её частью.

Существует также и понятие *гибкого органа*. Гибкими органами в крановых механизмах подъема груза и изменения вылета стрелы, как правило, служат стальные канаты [158]. Лишь в механизмах подъема с ручным приводом иногда применяют грузовые цепи. В [209, с. 193] канат называют *гибким тяговым органом*.

Так, Шанников В. М. называл канаты, используемые в полиспастах грузоподъёмных машин гибкими элементами [99, с. 22].

Канаты и тросы являются неотъемлемой частью устройств, машин и механизмов, используемых в различных отраслях народного хозяйства: грузоподъёмных устройств и механизмов [6, 11–20, 89, 107–109, 124, 183, 186, 195, 199], шахтных подъёмных механизмов [24, 130], мостовых конструкций (мостов) [88, 101].

Как разновидность гибких связей необходимо отметить гибкие трубопроводы и шланги [86].

Исключительная податливость гибких связей при изгибе, склонность к потере устойчивости при сжатии и большим деформациям при растяжении, неоднородность свойств большинства из них отличают эти элементы от привычных для судостроителей металлических деталей [169, с. 62-63]. Необычны и методы их расчета. Ясное для инженера понятие — форма конструкции — у гибких связей в принципе определено только в зависимости от внешних сил и применительно к определенному моменту времени. Через несколько секунд после начала процесса колебания или в других условиях форма гибкой связи может оказаться иной. Из-за этого при работе с канатами приходится учитывать возможность их закручивания, при работе с тканями — вероятность их защемления силами трения. Такие трудности никогда не возникают при эксплуатации стальных балок, валов или листов.

Рассматривая поведение цепей, канатов и лент при эксплуатации и разрабатывая методы их расчета, как отмечал профессор Э. В. Магула, эти элементы можно моделировать *гибкими нитями,* а тканевые, пленочные и толстостенные оболочечные конструкции — *мягкими оболочками* [58].

1.2. Появление гибких связей в жизни человека. Исторический очерк

С тех пор, как человек начал использовать первые орудия труда, важное место среди них стали занимать различные типы ГС. Вначале это были трава, лианы, ветки деревьев и кустарников, древесная кора, камыш, затем жилы и кожа животных, их шерсть и волос, и уже затем — верёвки, изготовленные из кожи и шерсти, растительных волокон. Они использовались при изготовлении оружия (копий и ножей, стрел и топоров), орудий труда: охотничьих и рыбацких сетей [133], капканов и ловчих ям, лассо, верёвок для таранов, плотов, строительства примитивных шалашей и жилищ и многого другого. Лассо, видимо, возникло как охотничья снасть [226, с. 174], а затем получило распространение у скотоводов. Было известно в странах Древнего Востока, у скифов. С завозом в Америку лошадей и рогатого скота лассо сделалось распространённой снастью у некоторых индейских племён, занимавшихся конной охотой.

С развитием человеческой цивилизации и усложнением видов деятельности усложнялись и сами орудия труда. Наверное, трудно назвать сферу деятельности человека, где бы не применялись различные виды нитей, верёвок, канатов и тросов. Нас будет интересовать проблема появления и использования различных ГС в жизни человека, изготовленных из растительных волокон, процесс их возникновения и развития от появления первых орудий труда и до наших дней. Несомненно, они сыграли свою важную роль в развитии техники и продолжают использоваться до сих пор.

Первоначальное применение **натуральных текстильных волокон** (ВТН) в качестве материала для изготовления одежды относится к эпохе первобытно-общинного строя, когда, наряду со шкурами животных и древесной корой, человек стал использовать шерсть овец, коз, лам, а также стебли льна, крапивы и других растений [210, с. 26].

Одним из волокнистых растений, известных человеку с глубокой древности, является лён. Льняные ткани найдены при раскопках свайных построек в Швейцарии (на Цюрихском озере), относящихся к периоду неолита; в Египте при раскопках погребений эпохи Древнего Царства (2800–2400 лет до н. э.) [210, с. 26].

В русских землях лён был хорошо известен задолго до образования Киевской Руси, что подтверждается находками льняных изделий в могильниках и древними обрядовыми песнями. В древнейших русских летописях упоминается о льне, как об одном из наиболее распространённых предметов торговли и продукте, которым уплачивались подати и пошлины. В XIII–XIV вв. вывоз льна из Ростово-Суздальского и Владимиро-Московского княжеств, Новгородской земли имел важное значение для западноевропейских ремесленников. В XVI в. Россия становится основным поставщиком льняных тканей в Западную Европу. В середине XVII в. ежегодный вывоз их достигал полумиллиона аршин. Наряду со льном в Древней Руси была известна также пенька.

Льняная ткань вырабатывается из льняной пряжи [228, с. 95], в основном полотняным переплетением. Наиболее ценные свойства льняной ткани — высокая прочность и способность впитывать влагу при сравнительно большой воздухо- и теплопроницаемости, а также стойкость против гниения. Льняные ткани отличаются также добротностью, повышенной жёсткостью, которые усиливаются аппретированием. Льняные ткани весьма нóски и дают сравнительно небольшую усадку при увлажнении, масса 1 м^2 льняной ткани колеблется от 100 г (батист) до 1000 с лишним г (брезент). Льняные ткани применяют для изготовления бельевых, технических, тарных и др. изделий.

В средиземноморских государствах пенька была известна уже в античности, но использовать ее для такелажа судов начали, по всей вероятности, не ранее первых столетий нашей эры [210, с. 9]. Пенька оказалась прочнее применявшихся до нее материалов — эспарцета, лыка, кожаных ремней, так как она не растягивалась в такой степени, как перечисленные материалы. Таким образом, пенька позволила надежнее оснащать суда. Более совершенный такелаж способствовал повышению мореходных качеств судов. Дальние морские плавания не были бы возможны, не появись пеньковые тросы.

Потребление всех ВТН значительно возрастает в XVII–XVIII вв. с развитием мануфактурного текстильного производства и особенно в XIX в. с ростом фабричной промышленности [211]. Промышленный переворот конца XVIII – начала XIX вв. привёл к изменению соотношения в потреблении ВТН. Хлопчатобумажная промышленность Европы, не стеснённая средневековой цеховой регламентацией, ранее других отраслей текстильной промышленности завершила переход к машинному производству. Хлопчатобумажные ткани вытесняют льняные и шерстяные. Хлопок занимает первое место в мировом потреблении ВТН. В XX в. в связи с развитием промышленности искусственного волокна значительно расширяется ассортимент текстильных волокон.

Текстильная промышленность России перед Первой мировой войной 1914–18 гг. перерабатывала ежегодно до 360 тыс. т хлопка, более 80 тыс. т льна [210, с. 26]. Русский лён удовлетворял в это время до 80% мировой потребности. Однако производство остальных видов текстильного сырья отставало от потребности промышленности. Так, собственным хлопком удовлетворялось около 50% потребности в нём страны. Большая же часть хлопка ввозилась из-за границы. Дореволюционная Россия ввозила также тонкую шерсть, шёлк, джут. Сбор хлопка-волокна в СССР увеличился по сравнению с дореволюционным в 4 раза [205, с. 21]. Еще в дореволюционной России, благодаря работам Ф. М. Дмитриева, С. А. Фёдорова, П. П. Петрова, П. Ф. Ерченко, А. Г. Разуваева, А. Г. Архангельского и других, при ряде высших учебных заведений были созданы лаборатории, сконструирована оригинальная аппаратура и разработаны новые методы испытаний ВТН [210, с. 27].

Сырьём для изготовления кручёных изделий служило главным образом пеньковое волокно: в это время для производства канатной пряжи применяются лучшие сорта длинного пенькового волокна, для шпагатной и верёвочной пряжи — короткое пеньковое волокно и низкие сорта длинной пеньки, а также короткое льняное волокно. Кручёные изделия изготовляются также из хлопчатобумажной пряжи, бумаги (бумажный шпагат). Пряжа для мешков и упаковочных тканей изготовлялась также из джута или кенафа, большей частью с примесью льняного волокна. Пеньковджутовая промышленность состояла из отраслей: производства кручёных изделий (канаты, верёвки, шпагат) и мешочного производства (мешки, упаковочные и технические ткани) [217, с. 333]. В дореволюционной России пеньковджутовая промышленность носила в основном кустарный характер. Механизированные канатные фабрики почти не имели в своём составе прядильного производства и снабжались пряжей с ручных прядилен. Несмотря на наличие собственных сырьевых ресурсов (пеньки), значительная часть потребности страны в кручёных изделиях, в т. ч. вся потребность в сноповязальном шпагате, удовлетворялась за счёт импорта. На относительно более высоком уровне находилось производство мешков и упаковочных тканей из джута. Проблема сырья для текстильной промышленности была решена в СССР только после Великой Октябрьской социалистической революции в результате коллективизации, сделавшей возможным применение передовой сельскохозяйственной техники и агрономии.

В СССР за годы довоенных пятилеток пеньковджутовая промышленность освоила производство всех видов пеньковджутовых изделий. В 1940 г. выпуск кручёных изделий возрос по сравнению с 1912 г. — в 2,5 раза, выпуск мешков и упаковочной ткани — в 3 раза [212, с. 333]. Заново было создано механическое производство канатной пряжи. На всех предприятиях пеньковджутовой промышленности, в том числе и на канатных фабриках, производство велось по замкнутому циклу, включающему изготовление пряжи и свивку из неё готовых изделий. Во второй пятилетке (1933–37 гг.) был построен комбинат по производству шпагата и верёвки в г. Саранске Мордовской АССР. В республиках Средней Азии и Закавказья перед Великой Отечественной войной было начато возделывание джута. В годы первых пятилеток промышленное значение приобрели освоенные в СССР новые лубяные ВТН — кенаф, кендырь, рами, канатник.

О важности льняной и пеньковджутовой промышленности свидетельствовало то, что выходил даже ежемесячный производственно-массовый журнал Министерства сельского хозяйства СССР «Лён и конопля». Издавался в Москве с 1924 г. [227, с. 290]. Выходил под названиями: «Известия Всероссийского центрального кооперативного союза льноводов и коноплеводов» (1924, № 1–6), «Лёнпенька» (1924, № 7–12), «Лён-конопля» (1928–30), «Лён и конопля. Информационный бюллетень» (1931–55); с 1956 г. как «Лён и конопля». Он освещал вопросы экономики, селекции и семеноводства, технологии и механизации возделывания, а также первичной обработки льна, конопли и кенафа. Средний месячный тираж (1972 г.) составлял 11 800 экз.

В годы Великой Отечественной войны 1941–45 гг. предприятия пеньковджутовой промышленности на территории, оккупированной немецко-фашистскими войсками, были разрушены. В результате предпринятых в послевоенные годы больших работ по восстановлению и дальнейшему расширению пеньковджутовой промышленности производство канатов в 1953 г. превысило уровень 1940 г. на 53%, производство шпагата и верёвки — на 22% [217, с. 334]. В районах производства волокна джута и кенафа (в республиках Средней Азии) в послевоенные годы были созданы две новые фабрики по изготовлению упаковочной ткани из хлопка-сырца. В пятой пятилетке (1951–55 гг.) на Северном Кавказе (Ставрополь, Майкоп) построены новые шпагатно-верёвочная и крупная мешочная фабрики на базе использования местного сырья (южной конопли, кенафа, канатника).

Восстановление и дальнейшее расширение производственной мощности предприятий пеньковджутовой промышленности после войны осуществлялось на более высоком, чем в довоенное время, техническом уровне. Предприятия оснащались новым оборудованием — чесальными, ленточными, ровничными, прядильными и прядильно-гребенными машинами. Существующие ткацкие станки автоматизировались путём установки на них электроосновонаблюдателей и приборов для автоматической закладки початка. 45,7% пряжи для изготовления кручёных изделий вырабатывалось в 1952 г. на современном быстроходном оборудовании [217, с. 334]. Основные районы размещения пеньковджутовой промышленности — Одесская, Харьковская, Курская, Ленинградская, Горьковская области, Мордовская АССР.

В 50-х годах XX ст. развитая пеньковджутовая промышленность (главным образом мешочное производство) имелись в Чехословакии и Польше. Было развернуто строительство мешочных джутовых фабрик в Китае, одновременно здесь развивалась сырьевая база для мешочного производства (выращивание джута).

Из капиталистических стран пеньковджутовая промышленность была наиболее развита в США. В 1914 г. производство кручёных изделий здесь составляло 276 тыс. т, 265 тыс. т в 1929 г., около 275 тыс. т в 1953 г. [212, с. 334]. В 1951 г. из общего потребления в капиталистических странах пеньки и жёстких лубяных волокон (для изготовления кручёных изделий) в 720 тыс. т на долю США приходилось 264 тыс. т (37%), Англии — 108 тыс. т (15%), Франции — 61 тыс. т (8%), Западной Германии — 45 тыс. т (6%), Канады — 42 тыс. т (6%), Мексики — около 40 тыс. т [217, с. 334]. Во всех основных странах, производящих кручёные изделия, за исключением Мексики, производство их базировалось на переработке импортного сырья.

Для переработки стеблей и тресты конопли в пеньковое волокно были созданы специальные промышленные предприятия (заводы первичной обработки конопли), которые назывались пенькозаводы [217, с. 334]. В 1940 г. в СССР на пенькозаводах перерабатывалось 82% всей заготовляемой конопли и 83% в 1952 г. В годы Великой Отечественной войны 1941–45 гг. большая часть пенькозаводов, оказавшихся на оккупированной территории, была полностью или частично разрушена немецко-фашистскими захватчиками. Восстановление разрушенных и строительство новых пенькозаводов после войны осуществлялось на более высоком техническом уровне, чем в довоенные годы.

Переработка джута в капиталистических странах составляла 1942 тыс. т в 1929 г., 1825 тыс. т в 1938 г. и 1425 тыс. т в 1950 г. [212, с. 334]. Наиболее мощной промышленностью по производству мешков и тканей из джута обладала Индия, где перерабатывалось свыше 60% всего урожая джутового волокна капиталистических стран. Наряду с переработкой большей части джута собственного производства Индия импортировала значительные количества джута из Пакистана, являющегося в то время основным производителем джутового волокна. Производство джутовых изделий в Индии в 1952-53 гг. составило 891 тыс. т. Кроме Индии значительной джутовой промышленностью обладали Англия (производство 106 тыс. т в 1952 г.), Франция (101 тыс. т), США (ок. 80 тыс. т), Зап. Германия (75 тыс. т), Бельгия (67 тыс. т), Италия (54 тыс. т), Бразилия (ок. 30 тыс. т) [217, с. 334].

СССР в 50-е годы XX в. занимает первое место в мире по сбору льна и пеньки, второе — по сбору хлопка. На основе методов, разработанных И. В. Мичуриным и развитых Т. Д. Лысенко, советские учёные создали новые разновидности хлопка, льна и других ВТН. Работы советских агротехников С. С. Канаша, Л. В. Румшевича, А. И. Автономова и тысяч колхозников-опытников создали лучшие в мире разновидности средневолокнистого и тонковолокнистого хлопка [210, с. 26]. Около трети посевной площади льна в 1948 г. засеяны высококачественными сортами, выведенными советскими селекционерами.

Начиная с 50-х годов XX ст. в текстильной технике и технологии наметилась тенденция ко всё большему комбинированию в переработке ВТН, когда, например, шерстяная промышленность потребляет наряду с натуральной шерстью также искусственную шерсть, хлопок, штапельное волокно и искусственный шёлк. Особенно это стало характерным для конца XX ст., когда меха, шерсти и тканей стало требоваться всё больше, а натуральное сырьё стало всё больше дорожать. Выход из такой ситуации был найден в расширении производства изделий из искусственных волокон, тканей, меха и кожи. Кроме экономии естественных ресурсов это позволило получить новые материалы с ранее неизвестными характеристиками, что позволило человечеству начать освоение глубин Мирового океана, космического пространства.

Советские учёные провели многочисленные работы по исследованию ВТН. Исследования свойств хлопкового волокна В.Е. Зотиковым, В.С. Фёдоровым, А.Н. Соловьёвым, А.Н. Бояркиным и В.Н. Жуковым легли в основу стандартов и технологических режимов. Важное значение имеют исследования В.С. Клубова, В.П. Добычина и И.В. Крагельского в области лубяных волокон [210, с. 27].

В течение тысячелетий люди использовали в такелажном деле лишь натуральные растительные волокна. Прогресс современной науки позволил всего лишь за несколько десятилетий перейти к массовому и преимущественному использованию синтетических волокон, равноценных растительным и даже превосходящих последние по своим качествам [216, с. 11]. Химическая промышленность вырабатывает из нефти, угля или природного газа исходное для данного производства сырье — неорганические соединения, структуру которых образуют мелкие молекулы, имеющие небольшой удельный вес. Это сырье путем полимеризации перерабатывают в так называемые полимеры: искусственные смолы, различные пластмассы. Меньшая часть этой продукции после дальнейшей обработки становится пригодной для прядения, т. е. превращается в синтетическое волокно.

Чем же искусственные волокна лучше? Почему их использование в настоящее время получает превосходящее значение?

Впервые метод производства искусственного волокна был разработан и осуществлён в промышленных условиях французским инженером Г. Шардоне (1884) [210, с. 13]. Этим методом из азотнокислого эфира целлюлозы получали искусственное волокно, известное под названием нитрошёлка. Горючесть нитроцеллюлозы, для устранения которой необходимы сложные дополнительные операции, явилась причиной прекращения промышленного производства нитрошёлка в 30-х годах XX века.

К 1891 г. относится появление метода получения вискозного шёлка (метод производства был разработан Кроссом, Бивеном и Бидлем). Д.И. Менделеев, впервые поставивший вопрос о необходимости развития производства искусственного волокна в России, писал в одной из статей: «Пожелаем... чтобы у нас скорее привилось это дело (имеется в виду производство вискозного шёлка — прим. авт.) и распространилось широко потому, что наша страна изобилует всякими растительными продуктами, не находящими себе применения. При этом клетчатка

не истощает почву и для питания непригодна. ... Если бы мы отбросы (получаемые при переработке древесины — прим. авт.) превратили бы в изделия из вискозы, особенно волокно, то разбогатели бы побольше, чем от всей нашей торговли» (газета «Речь», 1900 г. от 18 августа) [210, с. 13].

В 1882 г. был найден способ получения нитей искусственного шёлка действием на хлопковую целлюлозу медно-аммиачного раствора. Способ этот в конце XIX в. был осуществлён в производственных условиях. После Первой мировой войны был разработан метод получения искусственного волокна из ацетил-целлюлозы, и в 1920 г. введена в эксплуатацию первая фабрика ацетатного шёлка [210, с. 13].

В России до революции 1917 г. работала только одна небольшая фабрика искусственного волокна, построенная бельгийскими капиталистами в 1909 г. В годы довоенных сталинских пятилеток в Советском Союзе был построен ряд крупных предприятий по производству искусственного волокна (преимущественно по вискозному способу), организованы кафедры во втузах, подготовлены инженерные и научно-исследовательские кадры по этой специальности, создан Научно-исследовательский институт искусственного волокна.

До середины 30-х гг. XX в. производство искусственного волокна базировалось во всём мире исключительно на переработке целлюлозы и её эфиров [210, с. 14]. В 1935 г. началось промышленное производство искусственного белкового волокна на основе казеина. Однако ввиду недостаточной прочности казеинового волокна, особенно во влажном состоянии, производство казеинового и вообще белкового искусственного волокна не получило значительного распространения.

Новым этапом в химии и технологии искусственного волокна является начавшееся в 1938–40 гг. промышленное производство синтетического волокна, которое стало возможным в результате большой исследовательской работы, а также широкого развития промышленности тяжёлого органического синтеза. При помощи способов синтезирования удалось впервые получить волокно с новыми, заранее заданными свойствами. Метод производства синтетического полиамидного волокна найлон был разработан в период 1936–38 гг. американским химиком Карозерсом. Большие заслуги в разработке новых типов полимеров для производства синтетических волокон принадлежат советским учёным: к 1937–38 гг. относится начало работ академика П. П. Шорыгина по получению синтетических полиамидов, пригодных для производства синтетических волокон [210, с. 13].

Наряду с расширением ассортимента непрерывно увеличивался объём производства **синтетических и искусственных волокон** (ВИиС). Если в 1913 г. мировое производство искусственного волокна составляло всего 11 тыс. т, то в 1949 г. оно выросло до 1200 тыс. т (табл. 1.1) [210, с.14]. Изменения в соотношении между отдельными методами производства искусственного и синтетического волокна для периода 1935–49 гг. характеризуются данными табл. 1.1 (в тыс. т от мирового производства) [210, с. 14].

Таблица 1.1. Производство искусственного и синтетического волокон в 1935–1949 гг., тыс. т

№	Название волокна	Годы	
		1935	1949
1.	Вискозное волокно	86	78
2.	Ацетатное волокно	11	16
3.	Медно-аммиачное волокно	3	1,4
4.	Синтетическое волокно	–	4,6

ВИиС применяются не только в качестве полноценных материалов в отраслях текстильной промышленности, но и для различных технических целей, например, для производства корда, образующего текстильный каркас авто- и авиапокрышек. Применение искусственных волокон вместо хлопкового волокна при изготовлении корда значительно повышает срок службы шин и уменьшает расход резины на их изготовление. Высокопрочный полиамидный шёлк употреблялся вместо натурального шёлка при изготовлении парашютов. Ацетатный шёлк широко используется для электроизоляции. Синтетические волокна применяются для изготовления чулочно-носочных изделий, рыболовных сетей, устойчивых к гниению, и фильтровальных тканей, устойчивых к действию химических реагентов.

После Великой Отечественной войны, уже в 1948 г. в СССР был достигнут довоенный уровень производства ВИиС. Были построены новые крупные предприятия по производству искусственного и синтетического волокон, обеспечивающие дальнейшее резкое увеличение объёма его производства. В это время в научных учреждениях СССР ведутся большие исследования по разработке новых методов производства ВИиС, по получению новых типов полимеров, пригодных для производства синтетического волокна. Работы академика П. П. Шорыгина были продолжены В. В. Коршаком и С. Р. Рафиковым. В 1944 г. И. Л. Кнунянцем, З. А. Роговиным и другими был предложен метод получения полиамидной смолы капрон, из которой в производственных условиях получается синтетическое волокно того же названия [210, с. 14]. За разработку и освоение метода получения нового вида искусственного волокна группе исследователей и инженеров под руководством И. Л. Кнунянца и З. А. Роговина в 1950 г. была присуждена Сталинская премия. Советскими исследователями в 1946–48 гг. разработан метод получения хлорированного полихлорвинила — смолы, применяемой для получения синтетического волокна хлорина. Значительно повысился уровень техники на советских заводах вискозного волокна в послевоенные годы. К числу новых оригинальных и технически прогрессивных способов получения искусственного волокна в эти годы относится, например, новый метод получения прядильных растворов. За разработку и реализацию в производственных условиях этого метода группе инженеров под руководством Е. М. Могилевского в 1949 г. присуждена Сталинская премия. За разработку нового метода получения штапельного волокна группе исследователей под руководством З. Ф. Кипершлака в 1950 г. также присуждена Сталинская премия [210, с. 14].

Производство искусственного волокна должно основываться на достаточно широкой и доступной сырьевой базе, обеспечивающей выпуск десятков тысяч тонн волокна в год. Главным видом сырья для получения искусственного волокна в 40–50-х гг. XX в. является целлюлоза. Так, например, из общего количества искусственного волокна, выработанного в 1948 г., не менее 92–95% было получено из целлюлозы и её эфиров. Для производства искусственного волокна использовались как выделенная из древесины (древесная) целлюлоза, так и коротковолокнистый хлопок (т. н. хлопковый пух), остающийся на семенах хлопчатника после снятия длинного хлопкового волокна, перерабатываемого в текстильной промышленности. Хлопковая целлюлоза содержит меньшее количество примесей. Этот вид целлюлозного материала имел ряд преимуществ при производстве отдельных видов искусственного волокна, в частности ацетатного шёлка. Основным видом целлюлозного сырья в эти годы всё-таки остаётся древесная целлюлоза.

Из других природных высокомолекулярных соединений для получения искусственных волокон практический интерес представляли белки, например, выделяемый из снятого, обезжиренного молока казеин, растительные белки (соя) и др. [210, с. 14]. Применение белков позволяло получить искусственные волокна, высокая эластичность и пониженная теплопроводность которых, в отличие от искусственных целлюлозных волокон, приближаются к соответствующим качествам шерстяного волокна. Однако искусственные белковые волокна не являются полноценными заменителями шерсти, так как основные физико-механические показатели этих волокон, в частности прочность в сухом и особенно во влажном состоянии, значительно ниже, чем у шерстяных волокон.

Свойство размягчённого стекла вытягиваться в тонкие нити было известно ещё древним египтянам. В 40-х гг. XVIII в. в Петербурге, на заводе, основанном М. В. Ломоносовым, изготовлялись стеклянные нити, из которых делались различные украшения для платьев и шляп [210]. Производством таких же украшений славились и венецианцы. Вследствие значительной толщины эти нити обладали повышенной хрупкостью и не нашли широкого применения для текстильных изделий. В 1914–16 гг. возникло производство стеклянной ваты, завоевавшей признание высокими теплоизоляционными свойствами.

1.3. Использование гибких связей в хозяйственной деятельности человека

Рассмотрим использование ГС в морском флоте. В качестве ГС в морском деле используют тросы, канаты, лини и т. п., которые ранее изготавливали из различных растительных волокон, позднее из стали, а в настоящее время также и из синтетических и других искусственных материалов. Кроме всего прочего, существуют и так называемые комбинированные тросы (пенька-сталь и пр.), кабель-тросы, имеющие довольно сложную конструкцию.

1.3.1. Гибкие связи из растительных волокон

Как известно, основой растительных тросов служат растительные волокна.

Растительные волокна. Функции растительных волокон — обеспечение упругой устойчивости и прочности органов растений [205, с. 20]. Волокна имеются в вегетативных органах огромного большинства сосудистых растений. Их нет или они малочисленны и слабо дифференцированы в погружённых в воду органах водных растений. В 50-е годы XX в. в технике, текстильном деле термин «растительные волокна» применялся очень широко: волокнами называли и волоски семян хлопчатника, тяжи волокон, сосудоволокнистые пучки из листьев новозеландского льна, из листьев агав и др.

В зависимости от их происхождения и локализации растительные волокна имеют специальные наименования. Особо выделяют так называемые перициклические волокна, которые в значительном количестве имеются в стеблях рами, кенафа, кендыря, конопли, джута, льна и используются как прядильные. Лубяными волокнами богаты стебли многих трав (например, из семейства мальвовых) и многих древесных растений (например, липы, шелковицы); эти волокна нередко пригодны как текстильное сырьё (обычно для более грубых изделий) [210, с. 20].

Обильны волокна в околоплодниках некоторых тыквенных (напр. видов рода люффы), пальм (например, кокосовой пальмы, Cocos nucifera). Эти клетки характеризуются, после полного сформирования, следующими чертами строения [210, с. 19]:

1) прозенхимны, т. е. имеют очертания сильно удлинённых цилиндров или призм с заострёнными веретёновидными или игловидными концами (рис. 1.1, поз. 1);

2) нередки отклонения от типично прозенхимной формы (волокна у конопли на концах либо более ветвисты, либо булавовидны, у кенафа — зубчатые, у рами — имеют форму лопаток, у крапивы — тупые);

3) стенки растительных волокон сильно и равномерно утолщены;

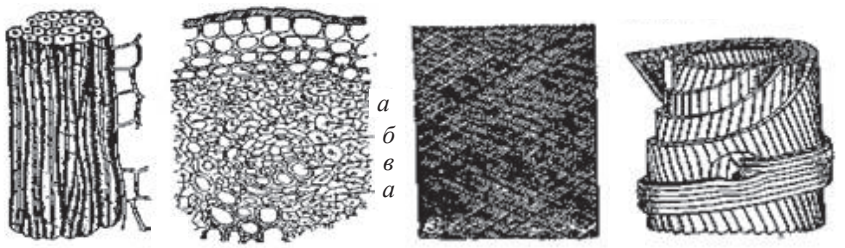


Рис. 1.1. Строение волокон:

1 — пучок волокон; справа — несколько паренхимных клеток (увеличено); *2* — часть поперечного разреза стебля василистника простого:

а — толстостенные волокна, *б* — луб, *в* — древесина проводящего пучка;

3 — полосатость (штриховатость) клеточной оболочки волокна барвинка; *4* — отпрепарированная часть клеточной оболочки растительного волокна (схема), оболочка построена из концентрических слоев толщиной каждый около 0,5 мм (увеличено) [210, с. 19]

4) поры в стенках, необходимые лишь для притока пластических веществ в период формирования волокна, малочисленны и щелевидны (рис. 1.1, поз. 3). При рассматривании пары пор (в плане) можно обнаружить, что щелевидные отверстия их перекрещиваются. Рост клеточной оболочки растительного волокна в толщину совершается с некоторой периодичностью, и на поперечных разрезах волокон нередко ясно видна (или проявляется воздействием реактивов и красок) слоистость оболочки (рис. 1.1, поз. 2, 4).

Перицикл (от пери... и греч. κγκlos — круг), перикамбий, образовательная ткань в корнях и иногда в стеблях растений, расположенная вокруг проводящего цилиндра [230, с. 420-421]. Перицикл представлен одним или несколькими (у голосеменных) слоями паренхимных клеток меристемы, отграниченных от клеток первичной коры её внутренним слоем — эндодермой. В перицикле корня закладываются все боковые корни, в корнях вторичного строения двудольных растений при помощи клеток перицикла клетки камбия смыкаются в общий цилиндр; перицикл формирует широкие лучи корня, в паренхиме которых откладываются продукты метаболизма и образуются новые придаточные корни, а иногда и придаточные корневые почки; при утолщении корня и отмирании первичной коры в перицикле дифференцируется феллоген, образующий на поверхности корня перидерму.

В тех случаях, когда перицикл имеется в стеблях растений, в нём возникают склеренхима и паренхима (у некоторых лиан семейства кирказоновых, тыквенных, паслёновых) или только склеренхима (у однодольных). У многих видов сложноцветных (скорционера, одуванчик и др.) в перицикле образуются членистые млечники, у зонтичных — эфирномасляные ходы, у тыквенных — выделительные клетки.

Волокно — тонкие нити различного происхождения: животного (шерсть, шёлк), растительного (хлопок, лён, пенька, джут, кенаф и др.) или минерального (асбест). Искусственное волокно изготовляется из стекла, природных высокомолекулярных соединений, как целлюлоза, белки; синтетическое волокно — из высокомолекулярных соединений, получаемых химическим синтезом [209, с. 332].

Волокнистые растения — группа растений, дающих волокнистый или прядильный материал для производства различных тканей, верёвочно-канатных и других изделий. Всего насчитывается около 2000 их видов. В СССР вплоть до 70-х годов XX в. промышленное значение имели хлопчатник, лён, конопля, кенаф, рами, кендырь.

Листовые волокна, извлекаемые из листьев разнообразных тропических растений, — наиболее грубые и жёсткие. Из текстильных бананов получается волокно абака (манильская пенька), из текстильных агав — сизаль, генекен и др., употребляемые для изготовления канатов, шпагатов, верёвок и т. п., а также грубых тканей — дорожек и др.

Волокна древесины — комплекс тканей, порождаемых камбием вовнутрь от себя, называют древесными волокнами, или волокнами либриформа [209, с. 19]. Богаты волокнами первичного происхождения стебли, листья, корни, плоды многих однодольных лилейных, например, листья т. н. новозеландского льна, около-

плодники кокосового ореха и др. Ранее эти волокна, за исключением древесных, называли лубяными волокнами.

Следует упомянуть о попытках применения волокон под названием «лесная шерсть» («сосновая шерсть»), получаемых из хвои сосен и других хвойных деревьев путём обессмоливания в процессе варки под давлением [210, с. 22]. Они использовались в качестве набивочного материала и частично — в прядении в смеси с хлопком. Проводились опыты по использованию в качестве изоляционного и перевязочного материала сфагнума (торфяного волокна) — цельных растений торфяного, сфагнового мха. Большим резервом текстильного сырья, возможно, являются волокна морских водорослей, еще совершенно не изученные.

Древесина — ткань растений, состоящая из клеток с одревесневшими стенками, проводящая воду и минеральные вещества, придающая прочность и нередко (главным образом у древесных растений) служащая хранилищем запасных питательных веществ. Состоит из сосудов, древесинных волокон и древесной паренхимы. Составляет у деревьев главную массу стволов, ветвей и корней. В технике и быту древесиной называют части древесных стволов и ветвей, лежащие внутрь от коры и используемые как строительный, поделочный, топливный и т. п. материал. Из древесины путём специальной обработки изготовляется целый ряд древесных материалов, отличающихся повышенной прочностью, водостойкостью и пр. (древесина прессованная, слоистая и т. д.) [210, с. 580].

Луб (флоэма) — сложная ткань высших растений, служащая для проведения органических веществ к различным органам [228, с. 41]. Луб выполняет также запасающую, нередко механическую и отчасти выделительную функции. В соответствии с многообразием функций для луба характерно наличие различных элементов: ситовидных элементов, клеток запасающей и кристаллоносной лубяной паренхимы, лубяных волокон и склереид, радиальной паренхимы сердцевинных лучей. У некоторых растений в лубе имеются млечники и смоляные ходы (рис. 1.2).

Запасающая ткань в лубе представлена клетками осевой лубяной и лучевой паренхимы. Лубяная паренхима образована удлинёнными клетками (веретеновидная паренхима) или короткими, соединёнными в вертикальный тяж (тяжевая паренхима). Клетки сердцевинных лучей образуются особыми инициальными клетками камбия и могут быть вытянуты в радиальном или в вертикальном направлении. В живых клетках луба накапливаются крахмал, масла и др. органические вещества, а также смолы и таннины. Лубяная паренхима может служить местом отложения кристаллов оксалата кальция. Млечники луба (например, у сложноцветных, бересклета) содержат каучук и гутту, а смоляные каналы (у многих хвойных) — живицу. Механическую функцию в лубе выполняют толстостенные лубяные волокна. У некоторых растений в лубе встречаются склереиды, часто образующиеся из паренхимных клеток в зоне уже непроводящего луба. По происхождению различают первичный луб, возникающий из прокамбия, и вторичный луб, связанный с деятельностью камбия. У древесных растении годичная слоистость луба выражена менее отчётливо, чем в древесине, что обусловлено быстро происходящими возрастными изменениями его структурных элементов.



Рис. 1.2. Анатомическое строение луба липы (поперечный срез):

с. т. — ситовидные трубки; с. п. — ситовидные пластинки; со — содержимое ситовидных трубок; с. к. — сопровождающие клетки; л. е. — лубяные волокна; п. с. л. — первичный сердцевинный луч; в. с. л. — вторичный сердцевинный луч; к.п. — кристаллоносные паренхимные клетки; кр — кристаллы оксалата кальция; др — друзы оксалата кальция; з. п. — клетки запасающей паренхимы [228]

Лубяные волокна — волокна, содержащиеся в стеблях наземных семенных растений, лишённые живого содержимого длинные прозенхимные клетки [228, с. 43]. В свою очередь луб или флоэма (от греч. φλοιξς — кора) — сложная ткань в теле высших растений, важной функцией которой является проведение в разные части тела растения органических веществ [214, с. 438]. Механическая ткань луба липы широко использовалась для плетения рогож, изготовления верёвок, канатов, корзин и т.п. Механической ткани луба в быту обычно присваивают термин «луб». В это же понятие включают все волокна, получаемые из коровой части растения, например, перицикловые растения.

Лубяные волокна получают из стеблей, листьев и плодов растений обычно в виде технических волокон. Наиболее тонкостеблевое волокно — лён, очень прочное, малорастяжимое, гигроскопичное. Из льняной пряжи вырабатывают тарные, бельевые, платьевые, технические и др. ткани. Отходы льна (короткое волокно) служат для производства тарных тканей, верёвок и др.

Стенки лубяных волокон — сильно и равномерно утолщённые, часто с хорошо выраженной слоистостью, с простыми порами и очень узкой клеточной полостью. Средняя длина лубяных волокон 1-2 мм, однако первичные лубяные волокна, возникающие из прокамбия, длиннее (20–400 мм), а вторичные (камбиального происхождения) — короче. У многих растений стенки лубяных волокон пропитаны лигнином; у некоторых же растений оболочки лубяных волокон состоят почти сплошь из целлюлозы, обладают эластичностью и большой прочностью. Технические лубяные волокна, получаемые путём первичной обработки лубяных культур, широко используются в текстильной промышленности для выработки пряжи. Различают лубяные волокна: тонкие, гибкие, мало одревесневшие (лён, рами); грубые, толстостенные, сильно одревесневшие (пенька, кенаф, джут, манильская пенька). Технические лубяные волокна состоят из склеенных между собой пучков элементарных волокон. Пряжа из льняного волокна используется для выработки тканей; из волокна пеньки сизаля и манильской пеньки — для изготовления кана-

тов, верёвок, шпагата, сердечников для стальных канатов и др. кручёных изделий; из волокон джута и кенафа — в основном для производства мешков. Волокно канатника, обладающее большой ломкостью, имеет в текстильной промышленности ограниченное применение; из него изготовляется пряжа для мешковой тары и для производства кабеля, где оно заменяет волокно джута.

Луб выделяют из стеблей на лубоотделительной машине, затем его подвергают биологической мочке и обрабатывают на трепально-промывной машине. Лубяные волокна сушат, мягчат и сортируют. Технология, при которой из стеблей сначала получают луб, перспективна и для льна.

Лубяные культуры — растения, возделываемые для получения лубяного волокна. Объединяют однолетние и многолетние виды, содержащие лубяные волокна в стеблях — лён-долгунец, конопля, кенаф, джут, рами, канатник, кендырь, кротолярия, сесбания, сида и др. и в листьях — агавы, новозеландский лён (формиум), прядильный банан, драцены, юкки и др. Лубяные культуры относятся к разным семействам, напр. лён-долгунец к сем. льновых, конопля — тутовых, кенаф — мальвовых, джут — липовых. Зоны произрастания их различны: лён-долгунец, конопля, канатник и сида — растения умеренных широт, остальные — тропических и субтропических и прилегающих к ним зон. Для промышленных целей возделывают джут, коноплю, лён и кенаф. В 1971 г. посевы их в мире занимали более 5 млн га [228, с. 43]. Ранее основные лубяные культуры — лён-долгунец и конопля. Площадь их (в млн га): в 1965 г. — 1,75, в 1970 г. — 1,48, в 1971 г. — 1,43; валовой сбор волокна соответственно 553,0; 546,0 и 547,1 тыс. т; урожай волокна льна 3,3, 3,6 и 3,9 ц с 1 га, конопли — 2,7, 4,5, 3,2 ц с 1 га.

О важности лубяных культур свидетельствует наличие Всесоюзного научно-исследовательского Института лубяных культур, организованного в 1931 г. в г. Глухове Сумской обл. [223, с. 43], на базе Зональной опытной станции прядильных культур. В 1931–44 гг. назывался Всесоюзным НИИ конопли, в 1944 г. был объединён с Институтом новых лубяных культур. Координировал научно-исследовательскую работу по конопле и кенафу опытных и учебных заведений СССР. Имел отделы (1972 г.): генетики, селекции и семеноводства конопли; агротехники и защиты растений; механизации; экономики; технологии и стандартизации; семеноводства зерновых культур; лаборатории — агрохимии и физиологии растений; контрольно-технологического анализа. В ведении института имелось опытное хозяйство, Золотоношский опорный пункт по конопле в г. Золотоноша Черкасской обл. Районированы выведенные институтом сорта конопли: Южная созревающая 6, Южная созревающая 9, Однодомная южносозревающая (ЮСО-1). В Институте существовали очная и заочная аспирантуры. Издавал «Труды...» (с 1933 г.). С 1959 г. выпускались тематические сборники научных работ.

Лыко — внутренняя (лубяная) часть коры молодых лиственных деревьев, преимущественно липы (иногда её называют луб) [228, с. 496], [228, с. 84]. Используется для плетения корзин и других изделий; раньше из лыка плели лапти.

Для характеристики формы растительных волокон при оценке их как текстильного сырья особенно важны: длина (l), поперечник средней призматической

части (*d*) и показатель прозенхимности (*l:d*). Значение поперечника *d* колеблется в сравнительно узких пределах и представляет величину порядка десяти или нескольких десятков μ; величины же *l* и *l/d* более разнообразны: так, длина волокон, находящих применение в качестве текстильного сырья, составляет у кенафа 4–12, у льна 4–60, у рами 3–350 (и даже до 420) мм; *l/d* у кенафа — 150, у льна — 1000, у рами — 2000 и более [211, с. 21].

Волокна текстильные натуральные (ВТН), протяжённые гибкие и прочные тела с очень малыми поперечными размерами, ограниченной длиной, пригодные для изготовления пряжи и текстильных изделий [222, с. 324].

На рис. 1.3 представлена классификация ВТН [229, с. 20].

ВТН — тела, которые формируются в природных условиях, имеют длину, значительно превышающую весьма малые поперечные размеры, обладают прочностью и способностью деформироваться (в особенности изгибаться) [229, с. 20]. Применяются для выработки нитей (пряжи), ваты, войлока и других текстильных изделий; получаемая пряжа перерабатывается в ткани, трикотаж, нитки, шнуры и прочие изделия. По химической природе основных составляющих веществ натуральные текстильные волокна делятся на органические и неорганические. К первым относятся ВТН растительного и животного, ко вторым — минерального происхождения. Волокна текстильные, не делящиеся в продольном направлении, называют элементарными, а состоящие из нескольких элементарных, скреплённых продольно, — техническими (комплексными). Элементарные текстильные



Рис. 1.3. Классификация текстильных натуральных волокон [229]

волокна значительной длины называют элементарными нитями. Почти все текстильные волокна состоят из высокомолекулярных веществ. Характерная особенность строения текстильных волокон — наличие продольных структурных элементов — фибрилл, слоев. Некоторые текстильные волокна имеют каналы, бывают извиты или скручены. Более поздняя классификация основных видов текстильных волокон приведена на рис. 1.4 [222, с. 324].

Основная масса текстильных волокон перерабатывается в пряжу, из которой изготовляют ткани, трикотаж, кручёные, галантерейные и др. текстильные изделия. Непосредственно из текстильных волокон вырабатывают валяльно-войлочные, ватные и значительную часть нетканых изделий.

Мировое производство текстильных волокон в 1968–69 гг. приведено в табл. 1.2, производство основных видов текстильных волокон в СССР — в табл. 1.3 [222, с. 324].



Рис. 1.4. Классификация основных видов текстильных волокон [222]

Таблица 1.2. Мировое производство текстильных волокон

№	Вид волокон и нитей	1968 / 69 гг.	
		млн т	%
1.	Хлопок-волокно	11,60	46,2
2.	Джут	2,74	10,9
3.	Пенька и др. грубые лубяные волокна	1,10	4,4
4.	Лён	0,67	2,7
5.	Шерсть мытая	1,61	6,4
6.	Шёлк натуральный	0,04	0,2
7.	Искусственное штапельное волокно	2,16	8,6
8.	Искусственные нити	1,42	5,6
9.	Синтетические нити и штапельное волокно	3,76	15,0
	Всего:	25,10	100,0

Таблица 1.3. Производство основных видов текстильных волокон в СССР (1969 г.)

№	Вид волокон и нитей	млн т
1.	Хлопок-волокно	1,92
2.	Пенька	0,07
3.	Лён	0,49
4.	Шерсть немытая	0,39
5.	Шёлк-сырец	0,003
6.	Искусственное штапельное волокно	0,22

Важнейшим, наиболее распространенным, дешёвым текстильным волокном является хлопок — прочное, тонкое, гигроскопичное волокно. Оно развивается на поверхности семян хлопчатника. Из хлопчатобумажной пряжи вырабатывают ткани бытовые для белья, одежды, технические, разнообразный трикотаж, швейные нитки, а из хлопка — вату, нетканые полотна и др.

Волокна, не делящиеся на более мелкие, называются элементарными. Комплексы элементарных волокон, склеенных (например, у льна) или взаимно удерживаемых силами кристаллизации (у асбеста), носят название **технических волокон** [210, с. 20]**.** Все волокна, даже элементарные, имеют в продольном направлении большое количество трещин и пор, что обусловливает лёгкую дробимость их в этом направлении. Отдельные долевые составляющие элементарных волокон называются фибриллами. Волокна большой протяжённости — до нескольких сот метров — принято называть элементарными нитями. Комплексные нити, составленные из нескольких элементарных, называют просто нитями. Среди ВТН преобладают короткие, т. е. элементарные, и технические. Для получения непрерывных нитей большой длины (пряжи) ВТН подвергают прядению.

Группа ВТН растительного происхождения в зависимости от того, из каких частей растений волокна получаются, делится на три подгруппы (иногда — четыре, см. рис. 1.4): семенных и плодовых, стеблевых и листовых [210, с. 21]. Последние две подгруппы объединяются общим названием лубяных.

Волокна семян и плодов.

Хлопок – основное текстильное волокно, составляющее около половины общего количества ежегодного сбора в мире всех текстильных волокон. Развивается в виде волосков на поверхности семян растения.

Высокие качественные показатели и дешевизна позволяют широко использовать хлопок в самых разнообразных областях. В СССР культивировались хлопчатники, преимущественно дающие средневолокнистый хлопок до 35 мм длиной, средней толщины, и тонковолокнистый (с более длинным и тонким волокном). Хлопок-волокно отделялся от семян машинами (волокноотделителями), прессовался в кипы и направлялся в дальнейшую переработку.

Хлопчатник (Gossypium), род многолетних растений сем. Мальвовых [233, с. 306-307]. В роде 35 видов, произрастающих в тропич. и субтропических р-нах Азии, Америки, Африки, Австралии. Выращивают как прядильные растения культурные формы в основном 4 видов: хлопок африкано-азиатский, травянистый,

гуза (G. herbaceum) — в странах Азии, заменён или заменяется более ценными сортами др. видов; Х. индокитайский, древовидный (G. arboreum) — в Индии, Пакистане, Бангладеш, Бирме, Китае и др.; хлопок мексиканский, обыкновенный, упланд (G. hirsutum) — в Туркмении, США, Бразилии, Мексике и др. главных хлопкосеющих странах; хлопок перуанский (G. barbadense) — в АРЕ (сорта египетского хлопка), Судане, Туркмении (сорта тонковолокнистого хлопка), США (сорта типа си-айленд) и др. Дикие виды: G. anomalum и G. capitis-viridis произрастают в саваннах Африки, G. stocksii и G. areyasianum — в Аравии, G. davidsonii и G. trilobum — эндемики Сев. Америки, G. sturtii и G. robinsonii — из Австралии.

Хозяйственное значение. Хлопок — одна из основных технических культур. В мировом производстве текстильного волокна хлопок занимает более 50%. Хлопковое волокно (выход его из хлопка-сырца 25–40%) перерабатывают в пряжу, которую используют для изготовления различных тканей, в т. ч. технических, а также корда для автопокрышек, сетей и ремней, обмотки для проводов. Хлопковое масло (в семенах его 22–29%) употребляют в пищу, из него изготавливают маргарин, глицерин, мыло, стеарин, смазочные материалы. Отходы, получаемые при очистке семян и в маслобойной промышленности, применяют для производства целлюлозы, спирта, лаков, линолеума, кино- и фотоплёнки, картона, изоляционных материалов. Жмых и шрот скармливают скоту, мука из них после удаления алкалоида госсипола (ядовит) может быть использована для извлечения пищевого белка. Из листьев хлопка получают уксусную, яблочную, лимонную и др. органические кислоты, стебли пригодны для изготовления строительных теплоизоляционных плит.

История культуры. Хлопок — одно из древних прядильных растений [233, с. 307]. Родина хлопководства — Индия, где в долине Инда уже в период харапской цивилизации (III тыс. до н.э.) выращивали хлопок и изготовляли пряжу из его волокна. Сведения о возделывании хлопка в Египте относятся к I в. до н. э. Первые сообщения об использовании в Китае волокна дикорастущего хлопка датируются II в. н. э., введение его в культуру — VII–IX вв. В X в. хлопок был завезён из Африки в Испанию, где вскоре в Барселоне возникло прядильное производство. На территории США колонисты стали сеять хлопок с начала XVII в., хотя коренное население Америки выращивало эту культуру уже в III–II-м тыс. до н. э. В Средней Азии хлопок возделывают с VI–V вв. до н. э.; в Закавказье с VII – IV вв. до н. э. Посевная площадь и урожайность хлопка, валовой сбор волокна в мире и отельных странах — основных производителях хлопка с 1961 по1975 г. приведены в табл. 1.4 [233, с. 307].

Районы выращивания хлопка в СССР: Средняя Азия (наибольшие площади в Узбекистане), Азербайджан, южные р-ны Казахстана. Возделывали сорта советского хлопка — средневолокнистого (относятся к хлопку мексиканскому) и тонковолокнистого (к хлопку перуанскому). На 1975 г. районировано 22 сорта. Лучшие из них: средневолокнистые — 108-Ф, Ташкент-1 (вилтоустойчивый), 149-Ф, 133 и др., тонковолокнистые — 9647-И, 8763-И, С-6030, 5595-В.

Таблица 1.4. Посевная площадь, валовой сбор волокна и урожайность хлопчатника (данные ФАО, 1975 г.)

№	Производители	Посевная площадь, млн га			Валовой сбор волокна, тыс. т			Урожайность (волокно, ц с 1 га)		
		1961–65	1970	1975	1961–65	1970	1975	1961–65	1970	1975
1.	СССР	2,421	2,746	2,924	1701	2343	2840	7,0	8,5	10,14
2.	США	5,915	4,518	5,078	3252	2213	2499	5,5	4,9	4,95
3.	КНР	4,314	5,059	4,816	1063	1518	2147	2,5	3,0	4,46
4.	Индия	8,029	7,610	7,689	924	820	1236	1,2	1.1	1,60
5.	Пакистан	1,467	1,747	2,031	383	528	634	2,6	3,0	3,13
6.	Бразилия	3,603	4,299	2,226	630	645	515	1,7	1,5	2,31
7.	Мексика	0,799	0,450	0,567	502	364	484	6,4	8,1	8,52
8.	АРЕ	0,738	0,683	0,610	452	509	438	6,1	7,5	7,17
	Всего в мире, в том числе	33,012	32,967	34,258	10798	11523	12333	3,3	3,5	3,60

Примечание: Урожайность хлопка-сырца (волокна, не очищенного от семян) в СССР 25,1 ц с 1 га в 1970 г., 28,1 ц с 1 га в 1976 г.

Изделия из ВТН широко применяются в быту для белья, платья, верхней одежды, обуви, убранства жилищ; в сельском хозяйстве и в самых разнообразных отраслях техники — в виде мешков, брезентов, приводных ремней, канатов, шпагата, рыболовных снастей, материалов для тепло- и электроизоляции, в резиновых изделиях, в авто- и авиапокрышках, для производства текстолита, различных фильтров и других изделий; в медицине — в виде нитей, марли и ваты и пр. Текстильные материалы из ВТН используются для нужд военной техники: на обмундирование и различные вещи личного состава армии, для палаток, зарядных мешков, парашютов, ранее использовались для оболочек аэростатов, для покрытий самолётов (перкаль) и пр. Из хлопчатобумажной пряжи вырабатываются бельевые, плательные, одёжные, технические ткани, швейные нитки, корд и др.

К малораспространённым ВТН относят **ластовень** (ваточник), (Vinatoxicum), род растений сем. ластовневых, нередко включаемый в род цинанхум [226, с. 174] — волокно, получаемое из семян растения того же названия (произрастает повсеместно), и капок — волокно, покрывающее внутреннюю поверхность плодов некоторых видов тропических деревьев (рис. 1.5 и 1.6) [210, с. 21]. Они в прядении не перерабатываются и применяются в основном в качестве набивочного материала для мебели, спасательных поясов и т. п.

Ваточник, род многолетних трав сем. ластовневых; родина — Северная Америка. Даёт прядильное волокно и каучук. Ранее культивировался ва юге Советского Союза [209, с. 204]. Многолетние травы или низкие кустарники с вьющимися наверху побегами и мелкими цветами. Около 30 видов в умеренных областях Евразии. В СССР существовало более 25 видов на юге Европейской части и на Кавказе по степным и каменистым склонам, кустарникам, опушкам, лесам.

Стеблевые волокна. У других прядильных растений волокна находятся в стеблях (лен, конопля, кенаф и др.) и в листьях (агава, прядильный банан, новозеландский лен). Эти растения называют лубяными культурами.

Число видов растений, дающих эти волокна, очень велико. Промышленное значение имеют лён, пенька, джут, кенаф, канатник, кендырь, рами и др. Стеблевые ВТН делятся на тонкие (лён и рами) и грубые (все остальные) [210, с. 21]. Тонкие волокна характеризуются незначительной степенью одревеснения (содержания лигнина), прочностью и гибкостью, дают тонкие пряжу и ткани, пригодные для широкого потребления (полотна, бельевые ткани) и для технических целей. Грубые волокна отличаются большим содержанием лигнина и вследствие этого — жёсткостью, поэтому применяются для производства грубых тканей (брезентов, тарных тканей) и кручёных изделий — канатов, верёвок, шпагата и пр.

Агава (Agave), род растений сем. агавовых. Стебель укороченный, с розеткой крупных, у мн. видов мясистых и колющих листьев (рис. 1.7) [219, с. 493].

Цветёт на 6–15-м году (редко позже), образуя цветонос (высотой до 12 м) с большим числом (до 17 тыс.) цветков; после созревания плодов надземная часть растения отмирает, а у ряда видов от корневищ отрастают новые растения. Свыше 300 видов агавы дико произрастают в Мексике и прилегающих к ней областях. В Европу агава завезена вскоре после открытия Америки. Наиболее распространена агава americana, культивируемая как декоративное растение в Средиземноморье.

В СССР культивировалась в парках Южного берега Крыма и Черноморского побережья Кавказа (рис. 1.8). Из листьев многих видов агавы изготавливают канаты, верёвки, шпагат, половики, упаковочные и др. грубые ткани. Некоторые виды агавы разводят в тропических областях обоих полушарий для получения волокна. Наиболее ценны A. sisalana, дающая т. н. сизаль, A. fouteroydes — генекен (юкатанский сизаль), A. cantala — кантала, и др.

Ворсянка — двулетнее растение сем. Ворсянковых (рис. 1.9). Возделывается с целью получения ворсильных (ворсовальных) шишек, применяемых в текст. промышленности для наведения ворса у шерстяных тканей. В Советском Союзе основные районы промышленной культуры ворсянки — степная часть Крыма [209, с. 341].



Рис. 1.5. Ваточник



Рис. 1.6. Ластовень ласточкин



Рис. 1.7. Агава американская



Рис. 1.8. Агава декоративная
(снимки сделаны автором в Ботаническом саду г. Балчик, Болгария, сентябрь 2015 г.)

Лён (Linum), род однолетних и многолетних травянистых растений и кустарников сем. Льновых [227, с. 288]. Свыше 200 видов, произрастающих преимущественно в субтропических и умеренных широтах; в СССР насчитывалось более 40 видов. Возделывают для получения волокна и семян в основном один вид — лён культурный (рис. 1.10), или слепец (L. usitatissimum), подразделяемый на 5 групп: долгунец, или прядильный (eloagata), межеумок, или промежуточный (intermedia), кудряш (brevimulticaulia), крупносемянный (macrospermum), стелющийся полуозимый (prostrata).

Несколько тысячелетий человек вел отбор лучших растений льна. Постепенно были выведены высокие, неветвистые формы с небольшим количеством семян — лен-долгунец, низкорослые ветвистые формы со множеством семян — лен-кудряш — промежуточные формы. Лён культурный происходит, вероятно, от льна узколистного (L. angustifolium), возделываемого в прошлом в горных субтропических районах (Индия, Китай, Средиземноморье, Закавказье). В СССР культивировался на волокно лён-долгунец. В посевах льна культурного как засоритель встречается лён-прыгунец (L. crepitans). Некоторые виды (L. graadiflorum, L. flavum, L. austriacum. и др.) выращивают в качестве декоративных растений.

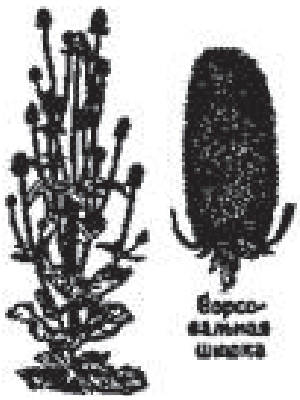


Рис. 1.9. Ворсянка

Лён получается из стеблей травянистого однолетнего растения того же названия. На волокно в основном культивируется лён-долгунец с длинным (80–100 см) и тонким (1–2 мм) стеблем, который даёт до 25% волокна от веса стеблей и до 10% семян, используемых для получения масла. Лён-долгунец введён в культуру на территории Грузии (Колхида), Египта и некоторых др. стран за неск. тысячелетий до н. э.



Рис. 1.10. Группы разновидностей льна

Волокно дикорастущего льна использовал еще первобытный человек. В Вавилонии, Ассирии, Египте, Абиссинии лен возделывали за несколько тысяч лет до нашей эры. Льняные ткани были найдены на мумиях египетских фараонов и жрецов. На гробницах фараонов изображены уборка, мочка льна, выделение волокна из стеблей и другие работы. Лён был известен и древним славянам [236, с. 130].

На территории Европейской части России лён-долгунец известен с глубокой древности (так, при раскопках свайного поселения на р. Модлоне в Вологодской обл., относящегося к началу II тыс. до н. э., найдены семена льна культурного, которые удалось прорастить, а также части прялки и отпечатки тканей на керамике) [227, с. 290]. В X–XIII вв. лён повсеместно распространился на Руси; в XIII–XVI вв. Новгород и Псков стали основными центрами производства льна и торговли им. К началу XIX в. льноводство развивалось почти во всех губерниях нечернозёмной зоны Европейской части России; в1860 г. лён-долгунец высевали на 650 тыс. га, в 1905–13 гг. — на 1 млн га. В 1971 г. мировая посевная площадь культуры превышала 1,5 млн га, преимущественно в СССР, Польше (98 тыс. га), Франции (43 тыс. га), Румынии (40 тыс. га), а также в Чехословакии, Болгарии, Аргентине, ГДР; мировой валовой сбор волокна 648 тыс. т, ср. урожай 4,2 ц с 1 га. В 1971 в СССР лён-долгунец занимал 1,26 млн га, валовой сбор волокна 450 тыс. т, ср. урожай 3,6 ц с 1 га [227, с. 290].

Основными льносеющими районами СССР были нечернозёмная зона РСФСР, Украины и Белоруссии; прибалтийские республики. Выращивались сорта советской селекции: на 1972 г. было районировано 20 сортов. Наибольшие площади занимали сорта Светоч, Л 1120, Томский 10, Томский 9, И 9, ВНИИЛ 11, Шокинский, Спартак и др.

Лен — очень важное прядильное растение. После уборки растения обмолачивают, а стебли подвергают первичной обработке (мочка или запаривание, мятьё

и трепание) для выделения волокна. Из льняного волокна (в стеблях его 20–28%), состоящего из элементарных волокон, изготовляют пряжу, а затем льняные ткани. Льняная пряжа применяется для изготовления тканей разнообразного назначения — от тонких льняных батистов и полотен до технических тканей, а также для выработки штучных изделий (скатертей, салфеток, полотенец). Дратва (дратвенная нитка), прочная кручёная льняная нитка, служащая при ремонте обуви для крепления подошвы к заготовке. Для предохранения от действия влаги Д. пропитывают варом [209, с. 580].

Кострy используют на топливо и в производстве термоизоляционных материалов и строительных плит. В семенах содержится 35–37% масла. Лён-долгунец — одна из наиболее трудоёмких культур. Процессы уборки и обработки льняных стеблей в СССР были полностью механизированы. Промышленность СССР выпускала комплекс машин, применение которых позволяло значительно снизить затраты труда и внедрить передовую технологию выращивания (льнокомбайн, льнотеребилка, льноподборщик-молотилка, льномолотилка, льнорасстилочная машина).

Лён масличный. Солома содержит 10–15% волокна, пригодного для выработки мешковины, брезента, шпагата. Лён масличный выращивали на территории СССР с глубокой древности. Старый район льносеяния — Северный Кавказ (в кон. XIX в. — около 500 тыс. га). В 1971 г. мировая посевная площадь льна составила более 6 млн га (преимущественно в Индии, США, Канаде, СССР, Аргентине), мировой валовой сбор семян 2878 тыс. т. Средний урожай 4,7 ц с l га. В СССР в 1971 г. посевы культуры занимали около 300 тыс. га, средний урожай 3,1 ц с 1 га (на Украине 7,5 ц) [208, с. 580]. Основные районы возделывания в СССР Казахстан, Западная Сибирь, Поволжье, степь Украины, Северный Кавказ, Центральночернозёмные области. Выращивали сорта Воронежский 1308, Сибиряк, ВНИИМК 5237 и др.; на 1972 г. районировано 18 сортов. По количеству собираемого волокна в СССР лен занимал второе место после хлопка.

На долю СССР приходилось около 70% мирового сбора льна [205, с. 21]. Его выращивали в Вологодской, Калининской, Ярославской, Смоленской, Кировской, Новгородской, Псковской и других областях России, а также в Белоруссии. Псковский лен многие столетия пользуется заслуженной мировой славой. Сеют лен и за рубежом: в Польше, Голландии, Бельгии, Франции, Англии, других странах.

Коноплёвые (Cannabaceae), семейство двудольных растений, родственное семейству тутовых [226, с. 34]. Прямостоячие или вьющиеся травы, распространённые преимущественно в умеренных областях. Однодомные или двудомные растения с мелкими невзрачными цветками в соцветиях; мужские соцветия — многоцветковые, метельчатовидные, женские — малоцветковые, головчатые или шишковидные. В семействе 2 рода (конопля и хмель) с 3–4 видами.

Третьей по значению прядильной культурой в СССР считалась конопля. В мировом производстве волокна она стоит на четвертом месте (после хлопчатника, джута и льна). Древние славяне из волокна конопли делали веревки, канаты и паруса.

Конопля (Cannabis), род однолетних лубоволокнистых растений семейства коноплёвых [226, с. 35]. В роде 3 очень близких вида: конопля культурная или посевная (C. sativa) — выращивается для получения волокна (преимущественно в Индии, странах Западной Европы, ранее в СССР), в диком состоянии произрастает в Монголии, Афганистане, Пакистане, Индии, Китае. Конопля индийская (C. indica) — возделывается в Индии, Иране, Турции, Сирии и др. странах для получения жирного масла из семян и гашиша, или анаши (наркотическое вещество), из зелёных частей растения и марихуаны из женских соцветий, в диком состоянии обитает в Пакистане и Афганистане. Конопля сорная (C. ruderalis) — злостный сорняк яровых культур (Западная Сибирь России, Средняя Азия, Поволжье). Многие авторы объединяют 3 вида конопли в один. Сорта культурной конопли подразделяют на географические группы. Ранее в СССР основными из них были северная, среднерусская и южная (наиболее урожайная).

Конопля культурная — однолетнее двудомное ветроопыляемое растение. Мужские особи — посконь, или замашка, женские — матерка (рис. 1.11, *а* и *б*) [236].

Стебель у молодых растений конопли округлый, мягкий, покрыт железистыми волосками; позднее древеснеет и становится гранёным. Высота от 0,5 до 4 м, толщина от 8 до 30 мм. Встречаются однодомные растения с мужскими и женскими цветками. Плод конопли — односемянный орешек, 1000 плодов весит 12–22 г. Вегетационный период конопли от 65–70 (у северной) до 140–160 (у южной) суток. Конопля очень требовательна к почвенной влаге, особенно в период бутонизации и цветения. В это же время она потребляет наибольшее количество питатательных веществ. Лучшие почвы для конопли — чернозёмы и осушенные торфяники. Из поскони и зеленца (матерка, убранная в период технической спелости) получают волокно (пеньку), из которого изготовляют ткани. Из волокна матерки, убранной на семена, делают морские канаты, верёвки, парусину и т. п. Выход волокна из сухих стеблей поскони 20–25%, матерки — 12–20%. Плоды



а *б*

Рис. 1.11. Конопля:
а — верхняя часть мужского растения; *б* — верхняя часть женского растения

конопли содержат 30–35% жирного масла, используемого в пищу и для технических целей. Конопляный жмых — ценный корм для скота. Садовую форму культурной конопли (var. sinensis) с красивой светлой зеленью выращивают как лиственно-декоративное растение.

Конопля — очень древняя культура. Родиной конопли считают Центральную Азию, где впервые её стали возделывать в I тыс. до н. э. На территории СССР коноплю выращивали уже в IX в., к этому времени относится и возникновение торговли пенькой. В Европе конопля распространилась только в XVI в. В 1971 г. мировая посевная площадь конопли составляла около 580 тыс. га, средний урожай волокна 4,7 ц с 1 га. В СССР в 1965–71 гг. посевы конопли не превышали 300 тыс. га [226, с. 36]. Урожаи волокна в передовых. хозяйствах 11–12 ц с 1 га. Основные коноплесеющие районы: центральночернозёмные области России, лесостепная и южная Украина, Белоруссия, Поволжье, Северный Кавказ и Западная Сибирь. Выращивают в основном селекц. сорта: Южную созревающую 6, Южную черкасскую, Краснодарскую 35 и др. Получены однодомные сорта конопли. Так как посконь созревает раньше матёрки, что создаёт неудобства при уборке.

Коноплю возделывают в конопляных и полевых севооборотах. При зеленцовой культуре (только на волокно) посконь и матерку убирают одновременно в начале отцветания поскони. После обмолота растения замачивают в водоёмах, затем тресту сушат и перерабатывают на волокно.

Конопля культурная, посевная (Cannabis sativa) — травянистое однолетнее волокнистое и масличное растение из сем. Moraceae — тутовых, подсемейства Cannabinaceae — коноплёвых [213, с. 396]. Близка к крапиве и хмелю и некоторыми систематиками отнесена к семейству Urticaceae — крапивных. Помимо вида C. sativa, в культуре встречается вид конопли индийская — C. indica — сильно разветвлённое растение, возделываемое для получения гашиша. Конопле культурной близка дикая конопля, подвид культурной, иногда относимая к самостоятельному виду C. Ruderalis, конопля сорная. Она произрастала в низовьях Волги, в Заволжье, в южной части Алтая, по р. Иртыш, за озером Байкал.

Волокно сосредоточено в ко́ровой части растения в виде отдельных пучков. На коноплезаводах стебли конопли подвергались механической обработке на мяльных и трепальных машинах для получения волокна — пеньки. Отходами производства являлись короткое волокно и костра. Короткое волокно дополнительно обрабатывали на куделеприготовительной машине, после чего большая часть его становилась пригодной для короткого прядения.

Пенька — грубое лубяное волокно, получаемое из стеблей конопли [217, с. 332]. Пенька получалась из стеблей двудомного однолетнего растения конопли, достигающего 3 м высоты. На практике пенькой называют также лубяные волокна растений других ботанических видов, например, манильская пенька, сизальская пенька. Техническое волокно пеньки состоит из склеенных элементарных волокон длиной 14–15 мм. На заводах первичной обработки в результате мятья и трепания вымоченных и высушенных стеблей конопли получалась пенька длиной

более 700 мм, а при очистке отходов трепания и из короткой, спутанной (низкосортной) тресты выделялось короткое волокно средней длиной 175–250 мм. Из длинной пеньки изготовляли канаты, канатно-верёвочные изделия, судоходные и рыболовные снасти, грубые ткани; из короткого волокна — верёвки и шпагат. Мужские растения (посконь) дают более тонкое и нежное волокно, чем женские (матерка), вызревают раньше, что приводит к раздельной уборке поскони и матерки. Пеньковая пряжа используется главным образом для изготовления кручёных изделий: канатов, верёвок, шпагата, судоходных снастей, рыболовных снастей, а также грубых тканей — мешковины и других тарных тканей, мебельных тканей, брезентов, парусины. Волокно конопли грубее льняного, но отличается большой прочностью.

Наиболее распространённое грубостеблевое влагоёмкое волокно — джут, применяемое для изготовление мешков (сахарных и др.); близок к нему по свойствам кенаф. Для производства канатов наряду с пенькой широко используют жёсткие листовые волокна — абаку или манильскую пеньку, сизаль и др.

Ранее пеньку (обработанные мочалистые волокна конопли) завозили из Персии, позже конопля культивировалась повсеместно в Европе. Парусные суда оснащались бегучим и стоячим такелажем из пеньки, она была одним из основных предметов европейского экспорта [237, с. 7]. Самым крупным экспортером была Россия. Транспортные суда, отправлявшиеся из Риги, доставляли ее даже в Америку. Из русской пеньки изготовляли такелаж для кораблей американского клиперного флота, сыгравшего огромную роль в истории мореплавания в середине XIX в. С течением времени экспорт русской пеньки утратил значение для Западной Европы, хотя Советский Союз и оставался ее крупнейшим производителем и поставщиком [211, с. 337].

Когда-то коноплю выращивали и в Швеции. Разведение конопли было возобновлено в 1941 г., так как военные действия на морских театрах прервали ее поставки [237, с. 7]. Но в настоящее время в Швеции ее больше не разводят, в конце XX ст. её ввозили главным образом из Италии и Югославии.

Манильская пенька (манила или абака) — волокно, извлекаемое из влагалищ листьев многолетнего тропического растения — текстильного банана (Musa textilis) или абаки [215, с. 213]. Культура абаки наиболее распространена на Филиппинских островах. Для выделения манильской пеньки растение срезают у корня, удаляют листовые пластинки (содержащие слабые волокна, используют для производства бумаги) и извлекают текстильное волокно, соскабливая сосудистые пучки из влагалищ листьев. Из одного ствола добывают в среднем около 0,5 кг манильской пеньки. Элементарные волокна имеют длины 2–12 мм и поперечник 12–46 μ (в среднем 17–18 μ). Идущие в переработку технические (комплексные) волокна состоят из склеенных элементарных волокон. Они имеют длину от 1 до 5 мм, грубы и жёстки, хорошо окрашиваются, равномерны по толщине, прочны и очень гигроскопичны. Из манильской пеньки изготовляют канаты, верёвки, шпагат. Ранее манильская пенька считалась лучшим материалом для морских канатов, т. к. сравнительно слабо разрушалась от действия морской воды.

Бомбейская пенька (также называлась мадрасской) [199, с. 8]. Получалась при переработке волокнистого растения, произрастающего в Южной Индии. Она дешевая в изготовлении, но менее прочная, чем обычная конопляная пенька. Использовалась для изготовления тросов, подвергающихся небольшой нагрузке, а также для свивки с волокнами манильской пеньки более низкого качества.

Мавританская пенька. Вид сизаля [199, с. 9].

Хенекен. Также вид сизаля. Произрастает в Мексике и на Кубе [199, с. 11].

Бамбук (от малайского bambu) — название древовидных злаков из рода Bambusa [221, с. 596]; около 70 видов в тропиках и субтропиках Азии, Африки и Америки; общее название для всех злаков подсемейства бамбуковых.

Бамбуковые, бамбуки (Bambusoideae), подсемейство злаков, иногда выделяемое в особое семейство (Bambusaceae) [221, с. 596]. Преимущественно корневищные многолетники с мощно развитым одревесневшим стеблем — соломиной. Высота достигает иногда более 40 м, диаметр до 30 см. Листья с влагалищем и небольшим черешком. Цветки обычно с 6 тычинками. Цветут бамбуковые или ежегодно или через значительные промежутки времени; у многих бамбуковых после зацветания происходит гибель подземных частей одновременно у всех экземпляров (иногда на больших территориях). Ок. 50 родов и 600 видов, растут гл. обр. в тропиках и субтропиках Юго-Вост. Азии и Малайского архипелага; меньше их в Африке и Америке; совсем немного в Австралии; в Европе бамбуковых нет; небольшое число приспособленных к умеренному климату бамбуковых дико растёт в Восточной Азии. В России (на Курильских о-вах и Сахалине) встречается несколько видов; они образуют густые, иногда труднопроходимые заросли под пологом лесов. Около 20 видов бамбука культивируют на Черноморском побережье, главным образом на Кавказе (рис. 1.12).



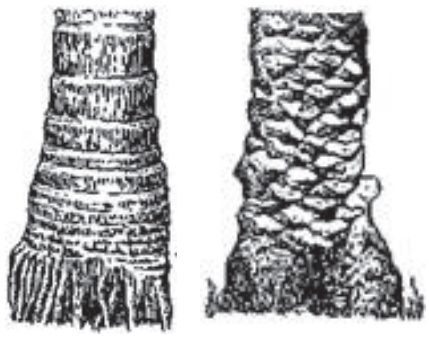
Рис. 1.12. Роща бамбука
(сфотографирована автором в Никитском ботаническом саду в Крыму, 2008 г.)

Часть из них, например Pseudosasaa japonica, довольно широко распространена; некоторые виды родов Pleioblastus и Phyllostachys достигают в культуре почти нормальной величины и имеют промышленное значение. Применение бамбуковых разнообразно: из одревесневших крупных соломин строят дома, мосты, водопроводы, изготовляют мебель, корзинки, шторы, циновки, полотенца.

Пальмы (Arecaceae или Palmae), семейство древовидных однодольных растений [229, с. 366]. Ствол обычно неветвящийся, колоннообразный, с кроной листьев на вершине, высотой до 60 м (например, цероксилон — 50–60 м) и до 1 м в диаметре (юбея), у некоторых видов дум-пальмы ствол ветвится, у других бочонковидно-вздутый (Colpothrinax) (рис. 1.13).

Многие пальмы имеют облик кустарников, так как у них развиваются многочисленные стебли из пазушных почек у основания ствола или на подземном корневище. У некоторых пальм надземные стебли почти или полностью отсутствуют и над землёй возвышаются только листья. Среди пальм есть лазящие лианы с тонкими (диаметр 2–3 см) и длинными (длиной до 300 м) стеблями (ротанг). У большинства пальм ствол гладкий, у некоторых покрыт остатками листовых черешков и влагалищ, расщепляющихся на волокна (трахикарпус); иногда на нём имеются колючки. Листья у пальмы очередные, перистые (у кариоты двоякоперистые) или веерные (если ось листа сильно укорочена); черешок с влагалищем. Длина перистых листьев может превышать 15 м (рафия); самые крупные веерные листья — диаметром св. 5 м — у таллипотовой пальмы. Все части листа могут иметь шипы; нижние сегменты перистого листа иногда превращены в колючки. У большинства лазящих пальм ось листа продолжается в усик, снабжённый когтевидными образованиями или обратно направленными колючками.

В семействе до 240 родов (ок. 3400 видов), распространённых главным образом в тропиках. Лишь немногие пальмы растут за пределами тропической зоны; в Европе (Испания, Юж. Франция) встречается только 1 вид пальм: хамеропс приземистый (Chamaerops humilis). Палеоботанические находки свидетельствуют,



1 *2*

Рис. 1.13. Стволы пальм:

1 — архонтофеникс Куннингама, заметны следы прикрепления листьев; *2* — финиковой пальмы с остатками черешков листьев

что в прошлом ареал пальм был значительно обширнее [229, с. 367]. Встречаются пальмы в самых различных экологических условиях: во влажных тропических лесах, на морских побережьях, в саваннах, в оазисах пустынь. Некоторые виды поднимаются в горы до 3 тыс. м (Ceroxylon в Андах — до 4 тыс. м).

Экономическое значение пальмы чрезвычайно велико. Многие пальмы стали объектом тропического земледелия, являясь в ряде стран основным источником жизненно важных продуктов для населения. Из крахмалистой сердцевины стволов получают саго (саговая пальма, маврикиева пальма и др.). Из плодов масличной пальмы и кокосовой пальмы добывают пищевое и техническое масло. Плоды финиковой и других пальм съедобны.

Многие пальмы — источник получения сахара, вина, спирта (из сока соцветий, собираемого при подсочке), растительного воска, т. н. растительной слоновой кости (твёрдые семена фителефас и др. пальм). Стволы пальм дают ценную строевую и поделочную древесину. Листья используют как сырьё для производства бумаги, как кровельный материал, для плетения корзин, циновок, матов, для получения волокна.

Издавна пальмы культивируют как декоративные растения в открытом грунте, в оранжереях и комнатах. В Украине на Южном берегу Крыма (рис. 1.14 и 1.15) и Черноморском побережье Кавказа выращивают свыше 20 видов пальм. Наиболее выносливы из них при низких температурах трахикарпус и хамеропс. Размножают их семенами, некоторые виды отводками.



Рис. 1.14. Пальма с плодами, Крым, 2008 г.



Рис. 1.15. Автор на пальмовой аллее в г. Ялта, Крым, 2008 г.

Банан (Musa), род многолетних растений семейства Банановых [221, с. 597]. Банан — древнейшее культурное растение жаркого пояса (рис. 1.16).



Рис. 1.16. Банан. Гроздь созревших плодов

Родина банана — Китай и Индия. Здесь он до сих пор встречается в диком состоянии. Культура банана очень широко распространена во всех тропических областях, где средняя температура года не менее 20°С, главным образом в странах Южной Америки и Африки, в Индии, на Цейлоне и в Индонезии. Всего в мире под бананом занято около 2 млн га [236, с. 179]. Высокие, иногда гигантские травы с мощным корневищем и коротким стеблем. Листья очень крупные, во влагалищах, которые образуют многослойную трубку, — ложный стебель. Цветки однополые и обоеполые. Плод многосеменной, ягодовидный, толстокожий; у культурных форм он часто лишён семян и достигает 15 см в длину и 3–4 см в диаметре. Таких плодов на одной оси может развиваться до 300; их общая масса достигает 50–60 кг, на 40% состоит из кожуры и на 60% из мучнистой сладкой мякоти, семена не развиты.

Банан — одна из древних культур, а для тропических районов важнейшее пищевое растение и главная статья экспорта. Около 60–70 видов в тропиках и субтропиках Африки, Азии и Австралии. В культуре наиболее распространены гибридные теплолюбивые виды M. sapientum (десертные сорта — так называемый пизанг); а также сравнительно холодостойкий южнокитайский M. nana (M. cavendishii).

Как пищевое и одновременно текстильное растение в Африке разводят абиссинский Б. (M. ensete), который теперь чаще относят к роду Ensete (E. ventricosum) (рис. 1.17).

В качестве технического растения выращивают банан текстильный, или прядильный (M. textilis), из ложных стволов которого добывают лёгкое прочное волокно, т. н. манильскую пеньку (абака), используемую для изготовления морских канатов, рыболовных снастей и др.



Рис. 1.17. Банановая пальма

Абака (исп. abaci, от тагальск. abaka), 1) текстильный банан (Musa textilis), многолетнее тропич. растение сем. банановых; 2) волокно, извлекаемое из влагалищ листьев абаки, то же, что манильская пенька [219, с. 10–11].

Юкка (Yucca), род древовидных вечнозелёных растений семейства Агавовых (рис. 1.18) [235, с. 398]. Около 40 видов, на юге Северной Америки и в Центральной Америке, главным образом в засушливых районах.



Рис. 1.18. Юкка славная, цветущее и отцветшее растение; *а* — цветок в разрезе



Рис. 1.19. Кокосовая пальма

Стебли (иногда высотой до 12 м) способны ко вторичному утолщению и достигают диам. 30 см. Листья мечевидные, жёсткие, длиной часто более 1 м, венчают стебель или образуют прикорневую розетку. Цветки колокольчатые, до 300 в крупных пирамидальных верхушечных метёлках, высотой 0,5–2 м. Опыляются ночными бабочками из рода Pronuda. Плод — сухая коробочка или сочный, нераскрывающийся, у некоторых видов съедобный. Из листьев юкки нитчатой (Y. filamentosa), юкки сизой (Y. glauca), юкки славной (Y. gloriosa) и других получают волокно, используемое на мешковину, верёвки, плетёные изделия и пр. В Крыму и на Кавказе юкку выращивают как декоративные растения. Кстати, как декоративное растение растёт юкка в Украине в южных областях, что связано, очевидно, с изменением климата.

Кокосовая пальма (Cocos nucifera), растение сем. Пальм [229, с. 399]. Ствол высотой 20–25 м, диаметром 50–60 см; листья перистые (вайями), длиной 3–6,5 м. Цветки однополые, в колосках, собранных в метёлки (длиной до 1,2 м) (рис. 1.19).

Плод — кокосовый орех — костянка, весит 1,5–2,5 кг. Наружная оболочка плода пронизана волокнами, внутренняя — твёрдая, с 3 порами, ведущими к 3 семяпочкам, из которых только 1 развивается в семя. Из волокна оболочек плодов (койр), а также из волокон листьев изготовляют канаты, циновки, щётки и пр. Стволы — прекрасный строительный материал. Обычно растет на берегу, ствол её всегда наклонен в сторону воды. Теперь трудно установить, где была родина королевы пальм — в диком виде она нигде не встречается, а в культуре широко распространена во всех тропических странах Африки, в Индии, Южной Америке и на всех островах Тихого и Индийского океанов. Общая площадь плантаций кокосовой пальмы превышает 4 млн га [236, с. 177]. Кокосовую пальму с древних времён культивируют в тропиках обоих полушарий, главным образом на Филиппинах, о-вах Малайского архипелага, п-ове Малакка, в Индии и на о. Шри-Ланка (Цейлон). Площадь под её посадками 3,4 млн га. Кокосовая пальма — растение морских побережий. Кокосовые орехи, попадая в воду, разносятся морскими течениями. Ранее под назв. Кокосо-

вая пальма объединяли много разных видов, ныне относимых к другим близким родам (Arikuryroba, Butia, Syagrus) и к другим семействам пальм.

Койр, волокно из межплодника орехов кокосовой пальмы [225, с. 393]. Койр — одревесневшие сосудистые пучки красно-коричневого цвета, длиной 15–33 см, толщиной 0,05–0,3 мм. Лучший койр получают из недозревших орехов, которые вымачивают в морской воде, затем волокна вычёсывают. Самые длинные (25,4–30,5 см) и средние (20,3–25,4 см) волокна идут на изготовление койровой нити, из которой делают маты, циновки, не намокающие и не тонущие в воде верёвки и канаты, рыболовные сети, циновки. Грубое одревесневшее волокно зрелых орехов идёт на изготовление щёточных изделий, короткое и запутанное волокно — на набивку матрацев и подушек. Производят койр в Индии и на о. Шри-Ланка (Цейлон) [199, с. 11].

Хлопчатое дерево, хлопковое дерево, капоковое дерево (Ceiba pentandra), дерево семейства бомбаксовых, произрастающее в тропич. Америке [233, с. 306]. Из его плодов получают капок. Культивируют в тропических странах полушарий.

Джут (Corchorus), род растений семейства липовых [223, с. 216]. Родиной джута считается Индия. Джут — однолетнее волокнистое растение семейства липовых. Известно около 40 видов. Насчитывает до 30 видов, произрастающих в тропических районах Азии, Африки, Америки, Австралии. На волокно возделывают 2 однолетних вида: джут короткоплодный (C. capsularis) и джут длинноплодный (C. olitorius). Растение тепло-, свето- и влаголюбиво (рис. 1.20).

Растения высотой до 3,5 м с прямостоячим, ветвистым стеблем, стержневым корнем и очередными, овально-ланцетными, зубчатыми по краям листьями с придатками. Цветки мелкие, обоеполые, жёлтые, по 1 или 2–3 в пазухах листьев. Плод — ребристая коробочка; у длинноплодного — стручковидная (5–10 см), у короткоплодного — почти шаровидная (1–2 см). Семена мелкие, коричневой, серой или зелёной окраски. Практическое значение имеют длинноплодный и круглоплодный джут. Культура джута наиболее распространена в Индии. Волокно джута хорошо окрашивается. Применяется для изготовления тары (мешков), брезентов, канатов, обивочных тканей и др. В СССР джут заменялся кенафом, канатником и др. [209, с. 545].

Джут дает грубое, но очень длинное и прочное волокно. Волокно джута широко используют для изготовления технических упаковочных, мебельных и др. тканей, ковровых изделий. Содержание его в сухих стеблях 20–25%. Ткани из него не пропускают воду, их применяют для упаковки сахара, соли, кофе, чая, шерсти, цемента и других товаров. Мировые площади посева джута в 1970 г. — более 2,9 млн га, валовой сбор волокна — около 3,7 млн т. Крупнейшие поставщики джута на мировой рынок — Индия и Пакистан. В СССР сорта джута длинноплодного (Первенец



Рис. 1.20. Джут: цветок и плод

Узбекистана и Узбекский 53) выращивали на небольших площадях в Средней Азии, средний урожай сухих стеблей 95–100 ц с 1 га. Стебли, связанные в снопы, просушивали и сдавали на лубяной завод для переработки. В мировом производстве волокна занимал второе место (после хлопчатника). Прежде джутовое волокно называли калькуттской пенькой [236, с. 132].

Хлопок. Это одно из древнейших культурных растений. Его выращивали в Индии и Китае еще за 2500 лет до н. э. [236, с. 129]. В наше время он возделывается на полях более 50 стран. В умеренных широтах он возделывается как однолетнее растение (рис. 1.21).

Высота куста — 1–1,5 м, цветки крупные, желтые, к вечеру становятся лиловыми; зацветают они утром и опадают в конце того же дня. Плод хлопчатника — коробочка [231, с. 129]. В СССР хлопчатник выращивали в Средней Азии, Казахстане и Закавказье. В диком состоянии хлопчатник встречается в тропических странах. Это многолетний кустарник из семейства мальвовых. Из 100 кг хлопка-сырца получают 28–42 кг чистого волокна (рис. 1.22) [236, с. 130].

Бамия (Hibiscus esculentus) — однолетнее растение сем. Мальвовых (рис. 1.23) [221, с. 596]. Родина — Восточная Африка. Культивируется в тропических и субтропических странах, в Северной Америке и в Южной Европе. В СССР выращивалось в Закавказье.

Высота растения до 1,5 м, по внешнему виду и цветкам напоминает хлопчатник. Незрелые стручковидные плоды бамии употребляются в пищу как овощ, из стеблей выделяют грубые волокна.

Новозеландский лен (другое название — формиум, лат. formium). Это светло-желтое жестковолокнистое растение с длинными волокнами, напоминающими волокна агавы [199, с. 11].



Рис. 1.21. Ветвь хлопчатника с коробочками и цветком; справа — семя с волокном и коробочка в разрезе



Рис. 1.22. Лопнули коробочки на кусте хлопчатника

Коробочка наполнена семенами, которые покрыты волосками (волокнами). Ради этих волокон и возделывается хлопчатник. Волокна хлопчатника обычно белые, но встречаются растения с волокнами бурого, зеленоватого и кремового цвета. Длина волокон от 25 до 38 мм, а у некоторых видов до 50 мм. Чем длиннее и тоньше волокно, тем оно ценнее.

Кенаф, канап, гибискус коноплёвый (Hibiscus cannabinus), пенька гамбо — вид однолетних лубоволокнистых растений семейства мальвовых [225, с. 37–38]. В диком состоянии, встречается в Южной Африке и Центральной Индии. Корень кенафа стержневой, ветвистый, проникает в почву на 30–50 см (иногда на 2 м). Стебель прямой, ребристый или округлый, с шипиками, высотой 1–5 м (рис. 1.24).



Рис. 1.23. Бамия

Листья крупные, средние — пальчатораздельные, нижние — сердцевидные, верхние — ланцетные. Цветки пазушные, 5-членные, крупные, кремовые с ярко-вишнёвым пятном внутри венчика. Плод — 5-гнёздная коробочка, густо покрытая жёсткими волосками, вызывающими раздражение кожи у человека. Семена серые, почковидные или треугольные; 1000 семян весит 20–28 г. Растение теплолюбиво и влаголюбиво. Семена начинают прорастать при 12–14°С. Вегетационный период 125–145 суток. Содержание волокна в сухих стеблях отечественных сортов кенафа 16–20%. Волокно отличается высокой гигроскопичностью и прочностью, из него изготовляют мешковину, брезент, шпагат, верёвки и др. Наибольшие площади посева кенафа в Индии (в 1970 г. более 300 тыс. га), где это растение было впервые введено в культуру. Кенаф выращивают также в Китае, Иране, Бразилии, США и других странах. В Россию завезён в XIX в. Его возделывают на небольших площадях в Узбекистане. Средний урожай сухих стеблей 40–60 ц с 1 га. На волокно кенаф убирают, когда первые коробочки станут светло-зелёными и на верхушке стебля появятся ланцетные листочки.



Рис. 1.24. Кенаф (слева направо и сверху вниз): растение, цветок, плод и семена

Кенаф — волокно из стеблей однолетнего травянистого растения того же названия. Из свежих стеблей прямо в поле извлекают луб и после просушки отправляют его на лубяной завод. Основным способом первичной обработки кенафа является вымачивание в холодной воде и обработка тресты в мокром состоянии, без предварительной сушки. Кенаф — заменитель джута [210, с. 22].

Канатник (Abutilon), род однолетних и многолетних растений сем. Мальвовых [219, с. 320]. Травы, кустарники и реже небольшие деревья, часто мягко опушённые. Листья обычно цельные и сердцевидные, реже иной формы (рис. 1.25). Цветки крупные, пазушные, без подчашия; венчик обычно жёлтый. Род канатников объединяет св. 150 (по др. данным 400 и более) видов, произрастающих преимущественно в тропиках и субтропиках обоих полушарий.

В СССР был известен один вид — канатник Теофраста [A. theophrasti (A. avicennae)], на юге европейской части, на Кавказе и в Средней Азии, который наиболее распространён в культуре как волокнистое растение. Ещё около 10 видов выращивают на волокно или как декоративные. Канатник дает крепкое, но жесткое и ломкое волокно. Его примешивают к волокну других растений при изготовлении веревок, канатов, мешковины [236, с. 132].

Канатник, теофраста — однолетнее травянистое растение с прямым слаборазветвящимся на верхушке стеблем, высотой у культурных разновидностей до 4 м. Родина и древний центр культуры канатника — Китай, где его выращивают на больших площадях. Посевы канатника есть в Монголии, Японии, Египте, США и др. Канатник — стеблевое волокно однолетнего травянистого растения того же названия, неприхотливого и значительно менее требовательного к теплу и влаге, чем джут и кенаф. В сухих стеблях канатника содержится до 25% волокна, используемого для выработки пряжи, из которой изготовляют мешковину, шпагат, верёвки и др. Волокно канатника прочное, но ломкое. Для улучшения свойств его обычно подвергают варке в слабых растворах едкого натра. Из отходов изготовляют бумагу, изоляционные плиты. Пряжа из канатника употребляется преимущественно для изготовления тарных тканей [224, с. 22].

Кендырь (турка) — виды растений из родов Trachomitum и Apocynum сем. кутровых. Произрастают преимущественно в Северной Америке, Южной Европе и Юго-Восточной Азии [220, с. 39] (рис. 1.26).

Листья короткочерешковые, удлинённые. Цветки мелкие, белые, розовые, красно-фиолетовые. Плод — листовковидный, длиной 8–20 см. Семена мелкие, с шелковистыми волосками-летучками. В природных условиях кендырь венецианский размножается вегетативно и реже семенами. Нормального роста и развития растения достигают на 3-й год.



Рис. 1.25. Канатник (сверху вниз): верхняя часть стебля; цветок; плод.



Рис. 1.26. Кендырь: верхушка стебля с листьями и соцветиями, плод и семя с летучкой

В СССР кендырь встречался по поймам рек Средней Азии, в дельте Волги, Урала и др. Для получения волокна перспективен кендырь венецианский (T. venetum) — многолетнее травянистое растение. Подземная часть его состоит из корневищ толщиной 15 см, корней размножения и питания, на к-рых расположены почки, дающие начало новым побегам. Надземная часть из 5–10 ветвистых, прямостоячих стеблей высотой 1–1,5 м; 1000 семян весит 0,3–1 г. Попытки внедрения кендыря в культуру в СССР не увенчались успехом.

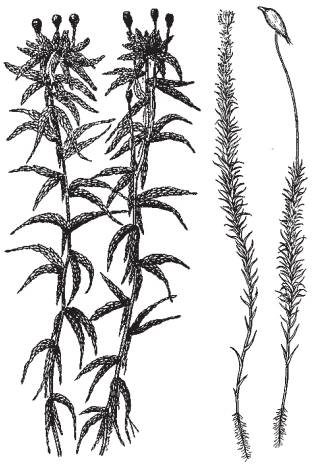
В первичной обработке луб кендыря выделяется из немочёных стеблей. В результате химической и механической обработки луб принимает вид хлопкообразной массы — котонина, состоящей из мелких комплексов отдельных элементарных волокон. Котонин можно использовать в прядении в смеси с хлопком и другими волокнами [210, с. 22]. В стеблях содержится до 20–27% луба, в лубе — до 10% волокна, отличающегося гибкостью, прочностью и стойкостью к загниванию, пригодно для изготовления верёвок, рыболовных сетей и др.

Рами — растение из рода бёмерия (Beehmeria) семейства крапивных [229, с. 453]. Чаще рами называют бёмерию белоснежную, иначе китайскую крапиву, B. nivea, или рами белое (иногда в качестве особого вида выделяют рами зелёное — B. viridis, или B. utilis). Рами — многолетник с мощной корневой системой и прямостоячими, цилиндрическими неветвистыми стеблями. Цветки мелкие, однополые (растения обычно однодомные), в многоцветковых соцветиях. Р. родом из Китая. Растение издавна культивируют ради луба, дающего прочное, эластичное, длинное волокно (длиной 62–95 мм). Рами — ценное волокно из стеблей многолетнего травянистого растения, произрастающего в тропиках и субтропиках, культивируется в странах Юго-Восточной Азии и в Китае, в тропиках собирают 3 (и больше) урожая в год. Главный поставщик рами на мировые рынки — Китай, в меньшей степени — другие страны Южной и Восточной Азии. В СССР рами выращивался в небольшом количестве в Грузии.

Волокно рами очень длинное, в среднем 9,5 см. Отличается блеском и почти не подвержено гниению, ослепительно белое, имеет шелковистый блеск и крепче волокон хлопчатника, льна и конопли. Волокно рами идёт на изготовление высококачественных бельевых, одёжных и технических тканей, рыболовных сетей, высших сортов бумаги (в частности, для денежных знаков) [210, с. 22].

Представителем белых, или сфагновых, мхов является сфагнум (рис. 1.27) [178, с. 114]. Стебель сфагнума ветвистый, снаружи покрыт мертвыми клетками, по которым поступает вода.

Стебель его густо усажен мутовчато расположенными мелкими листочками, имеющими беловато-зеленоватый цвет; в них находятся мелкие хлоро-



а *б*

Рис. 1.27. Мхи:
а — сфагнум; *б* — кукушкин лен



Рис. 1.28. Сосна обыкновенная

филлоносные клетки удлиненной формы, между которыми расположены крупные мертвые бесцветные клетки с порами. Говоря о растениях, из которых возможно изготовление нитей для верёвок и канатов, нельзя не сказать о растениях, которые произрастают в Украине и являются хорошим сырьём для производства различных ГС.

Сосна обычная — Pinus sylvestris L. Отдел сосновые (голосеменные) — Pinophyta (Gymnospermae). Русские названия — сосна обыкновенная, сосна лесная. Из семейства сосновых — Pinaceae (рис. 1.28) [133, с. 33].

Сосна обычная является основной лесообразующей породой в Украинском Полесье. Создает чистые и смешанные леса. Распространена на Полесье, в северной части Лесостепи, изредка на песчаных террасах рек северной части Степи. Она занимает около 35 % государственного лесного фонда Украины [133, с. 34]. Высокое дерево (25–50 м) с конусообразной или пирамидальной кроной и моноподиальным, кольчатым ветвлением. Кора красновато-бурая, чешуйчатая. Молодые побеги зеленоватые, поздние — изжелта-серые. Укороченные побеги несут две хвоинки 4,5–7 см длиной, темно-зеленые, держатся 3–5 лет. В культурах встречается: *сосна Веймутова* — Pinus strobus L. — дерево с зеленовато-серой корой, хвоя тоненькая, мягкая, размещённая по пять на укороченных побегах; *сосна Банкса* — P. Banksiana lamb., которая отмечается короткой (2–4 см) скрученной хвоей и согнутыми крючковатыми шишками, которые иногда размещаются прямо на стволах.

Практическое использование: волокнистое растение. Дерево сосны идет на изготовление искусственных тканей, древесные волокна длинные (2,6–4,4 мм). После удаления эфирного масла из хвои сосны получают сосновую или лесную шерсть [133, с. 35]. Выход волокна 13–15 %. Его используют в смеси с отходами хлопчатника (40 % сосновой ваты, 60 % отходов хлопчатника) или с шерстью для получения пряжи, из которой изготовляют фланель и одеяла. Сосновая вата с примесью бумажных нитей идет на изготовление матов и подстилок, а с коноплей и леном — бечевок и канатов. Сосновая вата — красивый набивной материал для матрасов и подушек.

Верба — Salix L. Отдел покрытосеменные (Magnoliophita). Класс двусемядольные — Magnoliopsida (Dicotilidones). Русское название — ива. Местное название — верба. Из семейства вербовых — Salicaceae (рис. 1.29) [133, с. 46–47].

Дерево (10–25 м высотой) с широкой округлой кроной, толстым стволом, покрытым темно-серой продольно-трещиновой корой. Молодые побеги и ветви бурые, с многочисленными шелковистыми волосками. Дерево, куст или полукуст. Древесные виды имеют толстые, неровные стволы, покрытые грубой трещиноватой корой.

Верба белая — Salix alba L. Русское название — ива белая, или серебристая, ветла. Местные названия — верба белая, ивняк, белотал. Растет на влажных лугах, по берегам водоемов.

Верба ломкая — Salix fragilis L. Русское название — ива, ракита (рис. 1.30) [133, с. 47].

Листки узколанцетные, занозопильчатые, голые, блестящие, длиннозаострённые, с косою верхушкой. Сережки (5–7 см длиной) цилиндрические, прицветочные чешуйки желтоватые. Дерево (10–20 м высотой) с серой глубокотрещиноватой корой. Ветви оливково-зелёные.

Верба пепельная — Salix cinerea L. Русское название — ива серая, пепельная. Высокий (3–6 м высотой) куст с очень опушенными, сверху серовато-зелеными, снизу серовато-войлочными листьями. Прилистники большие, зубчатые, почки опушены. Растет на болотах, влажных лугах, во влажных лесах, часто образовывая сплошные заросли.

Верба козья — Salix caprea L. Русское название — ива козья, бредина. Невысокое деревце (5–10 м высотой) с широкояйцеподобными, округлыми листьями (рис. 1.31) [133, с. 47]. Почки голые, дерево под корой красноватое, без валиков (в отличие от вербы пепельной). Растет в лиственных и смешанных лесах.

Верба ушастая — Salix aurita L. Русское название — ива ушастая (рис. 1.32) [133, с. 47]. Невысокий куст (до 1,5 м высотой), отличается от предыдущих видов перевёрнуто-яйцеподобными листьями, сверху серо-зелеными, снизу серовойлочными (1–2 см длиной). Дерево под корой с валиками. Растет по болотам, влажным лугам и во влажных и сырых лесах.

Верба трёхтычинковая, белотал — Salix triandra L. Русское название — ива трехтычинковая, белотал. Куст или небольшое дерево (до 5 м высотой) с характерной коркой, которая снимается серыми пластинами, оголяя розовую кору. Ветви тонкие, прямые, гибкие, густо облистнённые. Листки ланцетные, удлиненные или эллиптические, сверху темно-зеленые, снизу беловатые, прилистники долго не опадают. Растет по берегам речек, на эутрофных болотах, сырых пойменных лугах.



Рис. 1.29. Верба белая



Рис. 1.30. Верба ломкая



Рис. 1.31. Верба козья



Рис. 1.32. Верба ушастая



Рис. 1.33. Верба прутовидная

Верба пурпурная — Salix purpurea L. Русское название — ива пурпуровая, желтолозник. Куст, изредка небольшое деревце (до 4 м высотой). Побеги и ветви длинные, гибкие, голые, темно-пурпурные, иногда с сизым восковым налетом. Размещение листьев противоположное или косое встречное, листья тонкие, голые, зеленовато-сизые, обратноланцетные, цельные. Сережки тоненькие, сероватые, нити тычинок волосистые, выросшие. Растет по берегам рек, на песках, на заболоченных материковых лугах.

Верба прутовидная — Salix viminalis L. Русское название — ива прутовидная, корзиночная, конопляная. Высокий куст (5–10 м высотой) с прямостоящими ветвями. Листья линейно-ланцетные, острые, с завернутыми вниз краями, цельной формы, снизу шёлковисто-опушены (рис. 1.33) [133, с. 47].

Сережки толстые, пушистые, почти плоские. Растет по берегам рек, озер, преимущественно на Полесье. Вербы распространены по всей Украине, кроме высокогорья Карпат и Крыма. Верба прутовидная — одна из лучших верб, которые используются для плетения тонких изделий, получения лент. Из коры вербы после биологического вымачивания получают волокно, пригодное для изготовления веревок и мешковины. Практическое использование: некоторые виды верб дают доброкачественный материал для тонкого плетения. Лучшими из них являются вербы прутовидная, пурпуровая и тритычинковая [133, с. 48–49].

Верба пурпуровая используется для тонкого плетения в нерасщепленном виде. Из коры выделяют волокно, пригодное для изготовления веревок и мешковины. Прут из вербы тритычинковой тонкий, гибкий, плотный, вяжущий, белого цвета, широко используется без снятия коры для изготовления рыболовных снастей, а при снятой коре — корзин. Из коры получают волокно, пригодное для изготовления веревок и мешковины. Из коры вербы белой делают канаты.



Рис. 1.34. Крапива двудомная

Крапива двудомная — Urtica dioica L. Местные названия — жалящая крапива. Из семейства крапивных — Urticaceae (рис. 1.34) [133, с. 74].

Распространена по всей Украине. Промышленная заготовка возможна во всех областях, особенно в Лесостепи и на юге Полесья. Запасы сырья значительные, часто образовывает сплошные заросли. Многолетнее травянистое растение (50–120 см высотой) с ползучим, древовидным, ветвистым корневищем. Стебель прямой, четырехгранный, покрытый, как и всё растение, длинными и короткими стрекательными волосками. Листья (8–17 см длиной) противоположные, длинночеренковые. Растет в ольховниках, на покрытых бурьяном лесных площадях, в лиственных и смешанных лесах.

Крапива жгучая — U. Urenc L. (близкий вид) (рис. 1.35) [133, с. 74].

Практическое использование: волокнистое, красильное, косметическое растение. Из крапивы добывают и тонкое эластичное волокно, пригодное для изготовления тканей, мешковины, бечевки, шпагата, рыболовных сеток.



Рис. 1.35. Крапива жалистая

Отличается от крапивы двудомной меньшими размерами (10–60 см высотой), овальными пилообразными листьями. Растет на покрытых бурьяном лесных площадях, в лиственных и смешанных лесах.

Хаменерий узколистный, иван-чай — Chamaenarion angustifolium (L). Русское название — хаменерион узколистный, иван-чай. Местные названия — узколистный, кипрей, дикий лен. Из семейства онагровых — Onagraceae (рис. 1.36) [133, с. 148–149].

Многолетнее травянистое растение (50–150 см высотой) с толстым ползучим корневищем, которое имеет дополнительные почки. Стебель прямостоящий, цилиндрический, слаборазвитый, голый, как и всё растение. Листки чередующиеся, средних размеров. Цветки пурпурные, собранные в длинное (10–15 см) верхушечное китицеподобное соцветие. Плод — продолговатая стручкоподобная коробочка (90 мм длиной).

Энотера двухлетняя — Oenothera biennis L. Русское название — ослинник двулетний. Местные названия — трава ослиная, корень сладкий. Из семейства онагровых — Onagraceae (рис. 1.37) [133, с. 150–151]. Растет по всей Украине на песках, лесокультурных площадях, лесосеках. Двухлетнее травянистое растение. Стебель прямостоящий, крепкий (до 1 м высотой), простой или слаборазветвлённый, шерстисто-занозисто-волосистый, густо покрытый листьями, в основе стебля прикорневая розетка. Листья чередующиеся (20 см длиной), удлиненные,



Рис. 1.36. Хаменерий узколистный



Рис. 1.37. Энотера двухлетняя



Рис. 1.38. Пустырник пятилопастный (собачья крапива)

остроконечные. Листовая пластинка целостная, выемчато-зубчатая или почти сплошная. Цветы душистые, правильные, с двойным околоцветником, сидящие, собранные в длинные конечные кисти.

Практическое использование: стебельные волокна пригодны для грубой пряжи.

Собачья крапива пятилопастная — Leonurus quinquelobatus Gilib. Русское название — пустырник пятилопастный (рис. 1.38) [133, с. 183–184]. Местные названия — глухая крапива, сердешник, кропивничок. Из семейства губоцветных — Laminaceae (labiatae). Многолетнее травянистое растение (25–100 см высотой). Стебель прямостоящий, разветвленный, четырехгранный, опушенный короткими или длинными оттопыренными волосками. Листки противоположные черенку. Верхние листья трёхлопастные. Цветки неправильные, длинно-лепестковые, собраны на верхушках побегов. Растет как сорняк на лесосеках, в лесных культурах, в рассадниках, на опушках смешанных и лиственных лесов, возле лесных дорог и жилья. Распространено по всей Украине.

Практическое использование: из стеблей получают волокно. По качеству волокна она не уступает льну и китайской конопле — рами.

Посконник коноплёвый — Eupatorium cannabinum L. Русское название — посконник коноплевидний. Местные названия — данник, конопельник, конопля собачья и т.п. Из семейства астровых — Asteraceae (Compositae) (рис. 1.39) [133, с. 200]. Многолетнее травянистое растение 75–200 см высотой. Стебель прямостоящий, простой или разветвленный. Листья противоположные, короткочерешковые. Цветки сидят в мелких многочисленных корзинках 4–6-цветочные. Растет по всей Украине в ольховниках, по берегам речек, на заболоченных местах.



Рис. 1.39. Сидач коноплевый

Практическое использование: волокнистое, жиромасляное и декоративное растение. Стебель дает грубое волокно.

Рогоз широколистый — Typha latifolia L. Русское название — рогоз широколистый. Местные названия — рогоз, рогоза. Из семейства рогозовых — Typhaceae (рис. 1.40) [133, с. 221].

Многолетнее травянистое растение (100–250 см высотой) с утолщенным корневищем, покрытым чешуйчатоподобными листьями. Стебель толстый, цилиндрический, без узлов. Листья (до 20 мм шириной) чехольчатые, серо-зеленые, собранные в основе стебля. Цветы очень мелкие, однополые, в цилиндри-

ческих колосьях. Плод — маленький орешек со щетинками в основании. Растет по берегам водоемов, во рвах, на лесных болотах, в ольховниках, заплавах. Распространено по всей Украине.

Рогоз узколистый — T. angustifolia L. (близкий вид) (рис. 1.41) [133, с. 222–223]. Растет в тех же условиях, что и рогоз широколистный. Отличается от предыдущего вида узколинейными зелеными листьями (4–10 мм шириной), узкой цилиндрической бурой маточковой частью соцветия (10–35 см длиной), отмежеванной от тычинковой части голым промежутком оси (2–10 см длиной). Высота растения 1–2,5 м. Волоски, которые размещены возле плодов, длинные (10–15 мм), целлюлозные, образовывают компактную массу, так как в соцветии их очень много.



Рис. 1.40. Рогоз широколистый



Рис. 1.41. Рогоз узколистный

Практическое использование: плетёночное, волокнистое, целлюлозно-бумажное, строительное, пищевое, кормовое, лечебное и декоративное растение. Рогоз широко используют для плетения. Ручным способом из него плетут ажурные корзины. Изготовляют их из плотной рогозовой циновки, сотканной на вертикальном станке. Из рогоза изготовляют также мешки и маты. Циновки используют в строительстве вместо брезента, красивые (с разными рисунками) циновки на пол, плетеными косичками из листьев разукрашивают спинки и сидения вербной плетеной мебели.

Волокно, полученное из листьев и стеблей рогоза путем биологического вымачивания или химической варки, пригодно для изготовления бечевок, мешковины, матов, дорожек, а отходы волокна — войлока, бумаги, картона. Рогозовый пух используют на подкладку спасательных жилетов и курток, а также для набивки поплавков, из которых составляют плотики и пешеходные мостки, как теплоизоляционный материал в вагонах-холодильниках и термосах для мороженого, стебли — как подвязочный материал в садоводстве, виноградарстве, хмелеводстве, декоративном садоводстве и т.п. Волоски являются красивым сырьем для производства искусственного шелка.

В безлесных районах стебли идут на строительство плетней, покрытие крыш, хозяйственных зданий, на топливо. Надземная часть рогоза широколистного содержит 27,1 %, а узколистного — 29,2 % целлюлозы. Как подвязочный материал рогоз скашивают в июле, провяливают на солнце 2–3 суток, после чего нижнюю часть растения (60 см длиной) отрезают и просушивают на протяжении 6–7 дней. Высушенный материал перед использованием замачивают и разделяют на ленты.

Пушица влагалищная — Eriophorum vaginatum L. Русское название — пушица влагалищная. Из семейства осоковых — Cyperaceae (рис. 1.42) [133, с. 223].

Растет в заболоченных хвойных лесах, на торфяно-сфагновых болотах. Распространена на Полесье, в Карпатах, изредка на севере Лесостепи. По морфоло-



Рис. 1.42. Пушица влагалищная



Рис. 1.43. Пушица узколистная

гическим признакам пушица влагалищная похожа на пушицу узколистную.

Травянистое многолетнее плотнодернистое растение (30–100 см высотой), образовывает большие группы и имеет укороченное корневище. Растение серо-зеленое. Стебли многочисленные, гладкие, округлые, вверху тупые трёхгранные. Листья на неплодотворных побегах и в нижней части цветоносных побегов узкие (около 1 мм шириной). Прикорневые листки трехгранные, длинные, желобчатые, снизу острокилеватые, по краям шершавые, с длинными красновато-бурыми волокнистыми сумками. Плод — сплюснутый трехгранный орешек (около 2 мм длиной), рыжеватый, на конце с острием.

Пушица узколистная — E. Angustifolium L. Близкий вид (рис. 1.43) [133, с. 224]. Этот вид отличается от предыдущего наличием многочисленных колосков, собранных в зонтикообразное верхушечное соцветие с несколькими покровными листками.

Растет на низменных болотах и заболоченных лугах. Распространено на Полесье и в Карпатах, в Лесостепи редко.

Практическое использование: волокнистое и лечебное растение. Прицветные волоски пушицы (15–30 мм длиной) имеют тонкие целлюлозные стенки, но они не крепкие и не образовывают компактной массы, тем не менее при отсутствии других материалов ее волосками набивают подушки и матрасы, используют как упаковочный материал и т.п.

Осока трясучковидная — Carex brizoides Juslen. Русское название — осока трясучковидная. Народное название — осока трясучковидная. Из семейства осоковых — Cyperaceae (рис. 1.44) [133, с. 225]. Другие виды осоки приведены на рис. 1.45–1.46.

Многолетнее травянистое растение (30–60 см высотой) с длинным ползучим корневищем, на котором рядами размещенные стебли. Стебель трехгранный, без узлов, тонкий, обычно пригибается к земле, в основе со светло-бурыми, часто безлиственными стволами. Начиная с середины стебель острошершавый. Листья длиннее стеблей, светло-зеленые, 2–3 мм шириной, чехлы заперты, без язычка. Листья размещены на стебле в три ряда. Цветки однополые, невзрачные, без околоцветника, в колосках, собранных по 5–8 в верхушечное соцветие. Колоски бледные, желтоватые или зеленоватые, продолговатые, часто согнутые, собранные в рыхлый продолговатый колос (10–20 мм длиной).

Мешочек на верхушке сужен в носик, через узкий канал которого из мешочка выдвигается длинный столбик. Завязь верхняя. Плод — трехгранный орешек. Растет в лиственных, реже смешанных лесах, на вырубках, прогалинах. Распространено в западном Полесье.

Практическое использование: кормовое, декоративное и волокнистое растение.

Относительно длинная и мягкая листва осоки трясучковидной пригодна для набивки матрасов, подушек и на подстилку животным.

Зубровка душистая — Hierochloe odorata (L.) Wahlb. Русское название — зубровка душистая. Местные названия — чапула, чапол, зубровка и др. Из семейства тонконоговых — Poaceae (Gramineae) (рис. 1.47) [133, с. 225–226].

Язычок длинный (2–4 мм длиной), острый. Соцветие 5–8 см длиной с тонкими гладкими веточками. Колоски мелкие (3–5 мм длиной), яйцеобразные, немного сжатые по бокам, блестящие, золотисто-бурые, трёхцветковые, средние цветки двуполые, боковые — тычинковые. Плод — продолговатое зернышко. Растет в сосновых и смешанных лесах, на песках, лесокультурных площадях, вырубках, лужайках. Распространена преимущественно на Полесье и в Лесостепи. Многолетнее травянистое растение с длинными ползучими корневищами. Стебли голые, восходящие, гладкие, с полыми межузлами и утолщенными узлами. Листки чередующиеся, плоские, на бесплодных побегах — широколинейные (5–6 мм шириной), снизу зеленые, голые, сверху серо-зеленые, стебельные листки линейно-ланцетные, укороченные, с удлиненными гладкими или шершавыми чехлами.

Куничник наземный — Calamagrostis epigeios (L.) Roth. Русское название — вейник наземный. Местное название — куничник наземный. Из семейства тонконогих — Poaceae (Gramineae) (рис. 1.48) [133, с. 226]. Распространено по всей Украине.

Практическое использование: используется для плетения. Многолетнее травянистое растение (80–150 см высотой) с длинным ползучим корневищем. Стебель прямостоящий. Листки чередующиеся, голубовато- или серовато-зеленые. Цветки мелкие, невзрачные, собранные в крупные прямостоящие соцветия к 30 см длиной. Плод — продолговатое зернышко. Растет в сосновых и смешанных лесах, особенно в лесокультурах (злостный сорняк), на вырубках и пожарищах.



Рис. 1.44. Осока трясучковидная



Рис. 1.45. Осока волосистая



Рис. 1.46. Осока парвская



Рис. 1.47. Чаполоч ароматная



Рис. 1.48. Куничник наземный

Практическое использование: плетёночное, волокнистое, лечебное растение. Из длинных расщепленных стеблей куничника и его соломы плетут циновки и маты, им укрывают крыши хозяйственных зданий, используют на подстилку.

В Ботаническом институте Академии наук проводились опыты по получению волокна путем биологического вымачивания его листков и стеблей. Из волокна были изготовлены бечевки, которые имели неплохие показатели прочности (бечевка диаметром 10 мм выдержала 78 кг с удлинением на 17%, а конопляная 55–60 кг).

Камыш обычный — Phragmites australis (Cav.) Trin. Ex Steud. Русское название — тростник обыкновенный. Местные названия — камыш, камыши. Из семейства тонконогих — Poaceae (Gramineae) (рис. 1.49) [133, с. 227–228]. Растёт в ольховниках, на лесных и низменных болотах, в плавнях, часто образовывает густые заросли. Распространен по всей Украине. Камыш представляет собой удовлетворительное сырье для производства целлюлозы. Стебель содержит 63,3, а листки 24,5% целлюлозы. Средний выход целлюлозы в лабораторных условиях колеблется от 33 до 41%. Ключом к решению проблемы широкого использования ресурсов камыша как промышленного сырья является гидротехническое приведение в порядок пойм рек, которое предусматривает обвалование территории, искусственное затопление зарослей камыша и осушение их перед собиранием урожая, а также конструирование высокопроизводительных уборочных машин.

Травянистое многолетнее голубовато-зеленое растение (0,8–4 м высотой), с длинным ползучим корневищем. Стебель прямостоящий, круглый, толстый (до 12 мм), голый, гладкий. Размещение листьев очередное, стебель к верхушке безлистый. Листки линейно-ланцетные (1–5 см шириной), плоские, шершавые, по краю острошершавые. В месте перехода листовой пластинки во влагалище вместо язычка размещен ряд волосков. Цветки мелкие, невзрачные, собранные в крупное (10–30 см длиной) густое пушистое соцветие. Плод — продолговатое зёрнышко.



Рис. 1.49. Камыш обычный

Практическое использование: растение, которое дает строительный материал, целлюлозу; плетёночное, кормовое, витаминозное, пищевое, лечебное и фитомелиоративное растение. С давних пор камыш используют как строительный материал. Из него изготовляют твердо-прессованные и волокнистые звуко- и термоизоляционные плиты (камышит), доски для пола, облицовочные панели, гипсоволокнистые плиты, камышитобетон, пластики и другие строительные материалы. Камышовые плиты и маты широко используют в сахарной промышленности (годовая потребность республиканского сахаротреста представляет свыше 40 тыс. тонн). Камыш применяют как кровельный материал, а также плетут из него стены и перегородки в небольших хозяйственных зданиях, плетни, плотики для переправы через тихие протоки в дельтах речек и много других изделий. Из него изготовляют циновки для выкармливания червей шелкопряда, маты для парников, в степных районах используют на топливо.

Волокна животного происхождения. Волосы, роговые нитевидные производные кожи, образующие характерный для млекопитающих волосяной покров. Часть волос, свободно выступающая над поверхностью кожи, называется стержнем, часть, находящаяся в коже, — корнем, заканчивающимся луковицей, в которую вдаётся соединительнотканный сосочек с сосудами и нервами. Корневая часть волос в течение жизни организма подвергаются смене, которая у животных происходит периодически, подчиняясь определённым сезонным ритмам (линька) [209, с. 332].

Шерсть — волокно волосяного покрова овец, коз, верблюдов и др. животных, обладающее высокими эластичностью, гигроскопичностью и теплозащитными свойствами [222, с. 324]. Из шерсти в основном вырабатывают пряжу для костюмных, платьевых, пальтовых, технических тканей и верхнего трикотажа. Шерсть обладает способностью свойлачиваться, благодаря чему её применяют при выработке валяльно-войлочных изделий (войлоков, валенок, шляп и др.).

Кожа, наружный покров тела животных и человека, осуществляющий функции защиты организма от внешних воздействий, а также осязания, обмена веществ (в т. ч. газообмена), выделения, иногда и терморегуляции [225, с. 377–378].

Кожа состоит из наружного (эпителиального) и внутреннего (соединительнотканного) слоев, разделённых базальной мембраной и нередко образующих многочисленные производные (рис. 1.50, поз. *1*, *2*, *3*). Кожа предотвращает проникновение во внутреннюю среду организма микроорганизмов, ядовитых веществ, защищает от механических повреждений, воспринимает механические, температурные и болевые воздействия, определяет окраску животных, выделяет пахучие, ядовитые или питательные вещества, служащие сигналами, защитой или средством выкармливания потомства. У хорошо летающих (птицы) или плавающих (например, дельфины) животных их весьма высокие аэро- или гидродинамические качества в значительной степени обусловлены свойствами и активным функционированием кожи и её производных.

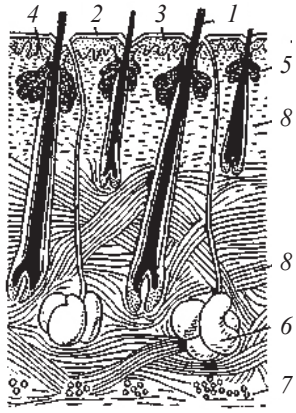


Рис. 1.50. Строение кожи млекопитающего (схема):

1 — волос; *2* — роговой слой эпидермиса; *3* — прочие слои эпидермиса; *4* — сосочки наружного слоя дермы, вдающиеся в эпидермис; *5* — сальные железы; *6* — потовые железы; *7* — жировая подкожная клетчатка; *8* — сетчатый слой дермы

Кожа (материал), вырабатывается из шкуры животного [225, с. 378]. Кожа — соответствующим образом обработанная дерма (сохранившая в основном природную волокнистую структуру), свойства которой под влиянием механических, физических и химических воздействий изменены в зависимости от назначения. В СССР по назначению кожу подразделяли на 4 класса: обувную, шорно-седельную, техническую и одёжногалантерейную.

Шёлк (от древнескандинавского silki), натуральная текстильная нить животного происхождения — продукт выделения шёлкоотделительных желёз гусениц шелкопрядов при завивке коконов [234, с. 372]. Промышленное значение в основном имеет шёлк тутового шелкопряда, разводимого в шелководческих хозяйствах. Гусеницы выделяют шёлк в виде 2 элементарных нитей (шелковин), состоящих из белкового вещества — фиброина (по массе 70–80%), окружённого другим белковым веществом — серициком (20–30%), который их склеивает в т. н. коконную нить. В нитях, кроме фиброина и серицина, присутствуют воски и жиры (1–1,5 %), а также минеральные вещества — соли калия, натрия, кальция и т. д. (1–1,5 %). Из коконной нити гусеница формирует плотную шёлковую оболочку — кокон, который является сырьём для получения шёлка. Шёлк отличается тониной, большой гигроскопичностью, лёгкой накрашиваемостью, приятным умеренным блеском. Он обладает хорошими механическими свойствами: разрывное напряжение — порядка 40 кгс/мм^2 (1 кгс/мм^2 = 10^7 н/м^2); разрывное удлинение 14–18%. Во влажном состоянии первое падает на 10%, второе на столько же растёт. Шёлк малоустойчив к действию щелочей (в 5%-ном растворе NaOH быстро разрушается); более устойчив к действию минеральных кислот. В обычных органических растворителях не растворяется. К действию света устойчивость шёлка невелика: уже за 200 часов инсоляции теряет половину прочности.

При размотке коконов получают непрерывную шёлковую нить длиной до 1200 м. Однако коконные нити, получаемые размоткой одиночных коконов, слишком тонки и поэтому в промышленности не применяются. Технической нитью являются нити шёлка-сырца. Неразматываемые коконы (бракованные, оставшиеся после выхода бабочки), а также отходы всех процессов шёлкового производства разрываются на короткие участки; эти волокна перерабатываются в шёлкопрядении.

Шелк–сырец — нити, получаемые при размотке коконов — употребляется непосредственно или после скручивания гл. обр. для выработки тканей — платьевых, бельевых, технических и др. [222, с. 324]. Расщипыванием шёлковых отходов получают шёлковые волокна, перерабатываемые в пряжу; из неё изготовляют полотна, ворсовые ткани.

Получение шёлка связано с большими трудовыми затратами, что делает его одним из наиболее дорогих текстильных материалов. Поэтому при выработке ряда тканей (в особенности подкладочных и технич.), чулок и т.п. шёлк вытеснен различными химическими волокнами. Мировое производство шёлка в 1976 г. достигало 49 тыс. т, из которых около 10% вырабатывалось в СССР. Натуральные текстильные волокна используют в чистом виде, а также в смесях (например,

шерсть-хлопок), чаще всего со штапельным волокнами. Смешивание улучшает качество (совмещаются различные ценные свойства компонентов), удешевляет производство, позволяет получать разнообразные внешние эффекты.

Растительные тросы. Из растительных тросов наиболее широкое применение имеют манильские, сизальские и пеньковые. Реже на морских торговых судах использовались тросы из хлопка, джута, льна и эспарцета [199, с. 7].

Канат, гибкое изделие, изготовленное из стальной проволоки, нитей, пряжи (каболки) из волокон растительного, синтетич. или минерального происхождения [224, с. 317]. По способу изготовления канаты подразделяются на кручёные (витые), невитые, плетёные.

Неметаллические (волокнистые) канаты свивают из длинных лубяных волокон русской (мягкой), манильской и сизальской (жёсткой) пеньки, семенных волокон кокосового ореха и хлопка, синтетич. волокон (полипропилена, капрона, нейлона, перлона и др.), волокон асбеста [224, с. 318]. Короткие волокна (пеньковые и хлопковые) используют для изготовления верёвок, шпагата и др. изделий. Неметаллические канаты выпускаются: витые (трёх- и четырёхпрядные), тросовой правой свивки, кабельтовые (трёхстренговые); плетёные обыкновенные круглые (фалы) и повышенной гибкости, т. н. морские. Диаметр волокнистых канатов из русской пеньки (бельной и смольной), манильской и сизальской пеньки 6,7–111,5 мм. Канаты из жёсткой пеньки имеют преимущество перед канатами из мягких волокон из-за большей прочности и износостойкости материала и меньшего веса. Высокими прочностными данными обладают канаты из синтетических волокон. Прочностная характеристика неметаллических канатов различных видов приведена в табл. 1.5 [224, с. 318].

Показатели важнейших свойств текстильных волокон приведены в табл. 1.6 [222, с. 325].

Физико-механические свойства натуральных волокон приведены в табл. 1.7 [210].

Пеньковый канат — толстая верёвка, скручиваемая из отдельных прядей — лиц, которые, в свою очередь, состоят из нитей пряжи — каболок. Крутка каболок обычно правая, крутка прядей — левая. Три или четыре пряди, скрученные вправо (так же как каболки), образуют пеньковый канат тросовой работы (рис. 1.51).

Таблица 1.5. Характеристика неметаллических канатов различных видов

Канаты	Диаметр, мм	Разрывное усилие, кН[1]
Пеньковые бельные	9,6 – 111,5	6,3 – 497,5
Пеньковые смольные	9,6 – 111,5	6,0 – 472,5
Сизальские	6,7 – 111,5	3,85 – 476,0
Манильские	9,6 – 111,5	7,76 – 637,0
Хлопчатобумажные	3,0 – 8,0	0,4 – 3,0
Полипропиленовые	7,9 – 28,7	7,0 – 48,0
Капроновые	7,9 – 63,7	11,8 – 592,0

[1]*Примечание:* 1 кН = 1000 кГс.

Таблица 1.6. Показатели важнейших свойств текстильных волокон

Виды волокон и нитей	Длина, мм	Толщина, г/км	Разрывное напряжение, МН/м^2	Удлинение, %	Влажность*, %
Хлопок	25–45	0,1–0,2	230–550	6–9	7–9
Лён технический	500–700	4,0–10,0	300–600	2–3	11–13
Шерсть тонкая	50–80	0,3–1,0	200–250	30–50	16–17
Шерсть грубая	50–200	1,2–3,0	150–200	25–35	14–15
Шёлк (нить коконная)	–	0,31–0,37	400–450	15–20	10–11

*При температуре 20°С и относительной влажности воздуха 65%.

Таблица 1.7. Физико-механические свойства натуральных волокон

№	Название волокна	Крепость (разрывная длина), км		Удлинение, %	
		в сухом состоянии	в мокром состоянии	в сухом состоянии	в мокром состоянии
1.	Хлопок средневолокнистый	24–27	26–30	6–8	7–9
2.	Натуральный шёлк (сырец)	30–35	22–30	15	20
3.	Шерсть	12–14	9–12	25	30



Рис. 1.51. Поперечное сечение пенькового каната [13, с. 17; 99]

Для получения особо гибкого пенькового каната (кабельтовой работы, или отворотного) несколько тросов скручиваются влево [217, с. 332]. Материалом для изготовления пенькового каната служила пенька — русская, итальянская, манильская (манилла), сизальская (сизаль) и другие лубяные волокна. В СССР основным сырьём для изготовления пенькового каната являлась русская пенька. Пеньковые канаты вырабатывались бельные — из несмолёной пряжи, и смольные — из просмолённой пряжи. Кроме того, изготовляли канаты, у которых отдельные пряди делались из стальной проволоки (т. н. канаты пенька-сталь). Заменителями пеньковых канатов являлись хлопчатобумажные канаты, а также канаты из нейлона, перлона и капрона.

Обычно при изготовлении канатов применялась русская, баденская или манильская пенька. Канаты, изготовленные из русской пеньки, превосходили в отношении гибкости канаты из манильской пеньки, но они были менее прочны, чем баденские и манильские канаты. Для предотвращения порчи пеньковых канатов от влаги их пропитывали смолой или карболинеумом, но при этом канаты теряли в прочности ~10%.

Применяемые в грузоподъемных машинах (полиспасты) гибкие элементы подразделяли на 2 основные группы, а именно:

1) тела нешарнирного типа, как-то пеньковые и стальные канаты;

2) тела шарнирного типа, к каковым относятся сварные цепи и цепи Галя [195, с. 22].

На промышленных предприятиях пеньковые канаты использовали преимущественно в качестве обвязочного материала: они являлись промежуточным звеном между грузом и крюком подъемного механизма. Применение пеньковых канатов как гибкого элемента полиспастов было ограничено, так как канаты даже при сравнительно большой грузоподъемности становились весьма громоздкими.

Пеньковые тросы. Итальянская пенька ранее считалась лучшей в мире, и тросы, изготовленные из нее, использовались на яхтах и военных кораблях [199, с. 7]. Италия экспортировала хорошо расчесанное сырье, из которого получали самые прочные бельные (несмоленые) или слабосмоленые тросы, такелаж для катеров. Суда торгового флота таким такелажем в настоящее время не оснащают.

Пеньковые тросы тоньше и мягче манильских и без труда пропитываются смолой. Мокрые бельные пеньковые тросы плохо сохнут и легко загнивают, т.к. тонкие волокна активно поглощают влагу. Поэтому пеньковые тросы, предназначенные для использования на судах, предварительно смолят. Смола уменьшает прочность троса на 15–20%, поскольку прожигает волокна пеньки, но вместе с тем и продлевает срок его службы, т.к. предохраняет от гниения. Несмоленые тросы из высококачественной пеньки прочнее тросов из других материалов, за исключением найлоновых. Манильские тросы высокого качества прочнее смоленых пеньковых, хотя пенька и долговечнее волокон абаки: внутренние пряди старых сильно изношеннных пеньковых тросов сохраняют прочность и пригодны к дальнейшему использованию.

Производство неметаллических (пеньковых) канатов. Ранее пеньковые канаты изготавливались на так называемых канатных дорогах (рис. 1.52), лицмашинах, свивальных машинах, стационарных прядевьющих и канатовьющих машинах, комбинированных машинах и др. [217, с. 332–333]. На канатных дорогах каболки последовательно вытягиваются и свиваются в пряди длиной до 350 м.

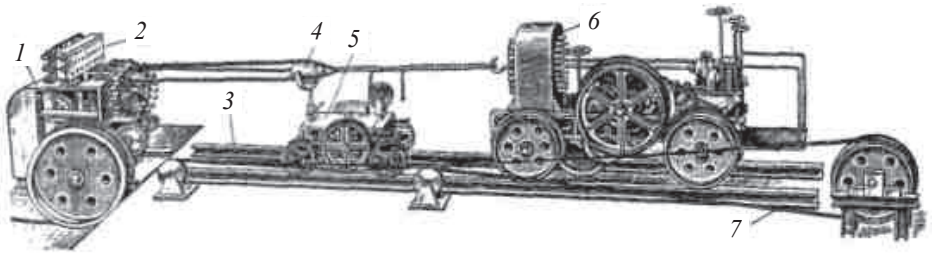


Рис. 1.52. Канатная дорога:

1 — передний лафет; *2* — рельсовый путь; *3* — калибродержатель; *4* — чекмарь; *5* — свивальная тележка; *6* — вытяжная машина; *7* — приводной канат [217]

Наиболее распространено было производство пеньковых канатов на канатных дорогах, позволяющих изготавливать их любых размеров, причём для этого достаточно было иметь 2–3 типоразмера дорог. К недостаткам канатных дорог относятся их большая длина (длина производственного корпуса — не меньше 350 м) и невозможность изготовления комбинированных канатов (пенька-сталь). Канатные мастера изготавливали тросы с помощью самопрялок. Некоторые тросы были большой длины (якорные канаты, например, имели длину 120 саженей), поэтому мастеру требовался длинный узкий коридор, длиной примерно в 200 саженей, так называемая «канатная дорожка» (нем. Reeperbahn) [60, с. 261].

В неметаллических (волокнистых) канатах пряди независимо от числа каболок свиваются за одну технологическую операцию. Шаг свивки прядей трёхпрядных канатов равен 0,65–0,75 длины окружности, шаг свивки кабельтовых канатов — 0,85–1,0, верёвок — 0,9–1,2, угол свивки — 27–33°. Направление свивки прядей и свивки каната или верёвки может быть разным. Перед свивкой проводят антикоррозийную смазку проволоки и прядей. Готовые изделия также смазывают и перед отправкой потребителям наматывают на барабаны.

Затем, проходя через головную стационарную и подвижную части машины, пряди подкручиваются и группируются по 3 или 4 на тележке с чекмарём — приспособлением для свивки каната. С помощью крючков головной и подвижной частей машины пряди свиваются в канаты тросовой, а затем кабельтовой свивки. На канатных дорогах изготовляют канаты или верёвки различных диаметров длиной до 250 м при использовании 2–3 типоразмеров.

На стационарных машинах изготовляют канаты и верёвки за две или одну технологическую операцию. В прядевьющих машинах, в отличие от машин для производства прядей из проволоки, катушки с каболками размещаются в шпулярниках, а свивальный орган объединён с тяговым и приёмным механизмами, которые расположены внутри него. Благодаря особой заправке прядей в свивальном органе (с дополнительным оборотом) совр. конструкции машин за один оборот свивального органа обеспечивают получение двух шагов свивки прядей. Канатовьющие машины для канатов из волокнистых материалов отличаются от проволочных канатовьющих машин роторного типа числом зарядных рам и конструкцией планетарного механизма.

Канатно-верёвочные изделия небольших диаметров изготовляются за одну технологическую операцию (одновременное изготовление прядей и свивка их в канат) на комбинированных шнур-машинах и т. н. габлёрках, состоящих из двух комбинированных крутильных органов: один — для прядей, а другой — для свивки каната (верёвки) в целом. Фалы изготовляют на оплёточных машинах, а морские плетёные канаты — на специальных плетельных машинах.

Джутовые тросы. Джут производили из мочалистых волокон высокого кустарника, произрастающего в Индии, родственного нашей липе (лубяное лыко). После срезки стебли кладут в воду, чтобы они стали мягче, затем слущивают лыко, промывают его и сушат. После этого сырье превращается в готовую товарную

продукцию. Джут добывается из стеблей однолетнего травянистого растения того же названия, достигающего высоты 3–4 м. Ранее в Индии первичная обработка джута выполнялась вручную, позже — механизированным способом: сдиранием мокрого волокна со стеблей. Джут разводили в Бенгалии и вывозили на судах из г. Калькутта. Джут — важнейший экспортный товар Индии. Во всем мире он является вторым по значению после хлопка сырьем для текстильной промышленности [199, с. 10]. До сих пор джутовая пряжа идёт на производство тарных и драпировочных тканей. Мешки из джута широко применяются для хранения влагоёмких пищевых продуктов (сахара и др.).

По прочности джут значительно уступает пеньке и волокнам из абаки. Поэтому из него редко делают снасти, а в основном плетут маты, ткут мешковину, рогожу. Неплотную джутовую ткань, мешковину широко используют как изоляционный материал и для упаковки хрупких грузов, которые могут получить повреждения от ударов при транспортировке [199, с. 11].

Льняные тросы. Лен используют только для изготовления линей (тонких тросов) и различных ниток, в частности парусных, а также тонкой парусины и брезента. Пожарные лини, спасательные концы изготовляли обычно из прочного льна высокого качества. У оплетенных лаглиней внешний слой плели из льна или пеньки, но внутренняя нить всегда изготовлялась из более дешевого материала, обычно джута [199, с. 10].

Хлопчатобумажные канаты применялись обычно для трансмиссионных передач. Пеньковый канат состоял из 3-х прядей; каждая прядь была свита из некоторого количества скрученных пеньковых нитей, изготовленных из мягкой трепаной пеньки [99, с. 22]. Прочность хлопковых тросов вдвое меньше прочности манильских.

Манильские тросы. Сырьем для манильских тросов служили сосудистые волокна черенковой части листьев банановых пальм вида Musa textilis (манила или абака — рис. 1.53) [199, с. 9], произрастающих на Филиппинских островах.

Манильские тросы по прочности не уступали пеньковому, но были более легкими, эластичными и не тонули в воде; употреблялись в основном для изготовления бегучего такелажа, буксирных канатов, швартовов и др. целей.

Манильский трос легко узнать по пятнистой поверхности, которая образуется при изготовлении от сочетания темных и светлых волокон (коричневых и золотистых). В отличие от сизальского поверхность нового манильского троса гладкая, с небольшим отливом.

Сизальские тросы. Изготовляются из волокон мясистых листьев различных видов алоэ, в частности вида Agave var. sisalana (сизаль или агава — рис. 1.54) [199, с. 8].

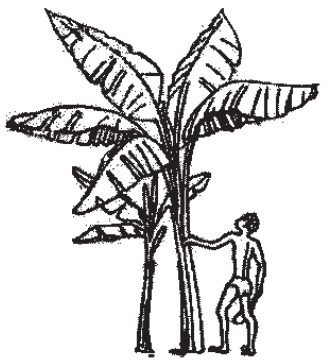


Рис. 1.53. Листья банановой пальмы (манила)



Рис. 1.54. Листья алоэ (сизаль)

Эти растения произрастают на сухих каменистых возвышенных плато в Центральной Америке. Такие тросы впервые были вывезены в Европу из небольшого порта Сизаль на северном побережье полуострова Юкатан. От этого порта они и получили свое название. Из Америки агава была завезена также в Восточную Африку, затем на острова Суматра и Ява. В настоящее время она встречается в различных тропических районах. Самые большие плантации этого растения находились в Танзании и Кении.

Сизальские тросы не уступали пеньковым, однако были более жесткими, хорошо впитывали влагу и поэтому быстро изнашивались. Использовались на судах для бегучего такелажа, швартовов и т. п.

Кокосовые тросы изготовлялись из волокон, образующихся на внешней поверхности скорлупы кокосового ореха. На шведских судах назывались грэс (gras — трава) [199, с. 10]. Кокосовые тросы легки и не тонут в воде, их основное достоинство — исключительная эластичность. Прочность кокосового троса в 4 раза, а масса вдвое меньше, чем у смоленого пенькового троса.

Канаты широко применяются во многих отраслях народного хозяйства: в строительстве, на транспорте, в рыбной, лесной, горнодобывающей промышленности, металлургии (табл. 1.8) [224, с. 318].

Таблица 1.8. Применение неметаллических канатов различных видов

Канаты	Применение
Тросовые бельные	Такелаж, обвязка тары
Тросовые смольные	Такелаж и др. (в основном на морском и речном транспорте)
Кабельтовые	Швартовные, буксирные
Плетёные (фалы)	Оснастка парусного флота, оснащение лага и др.

1.3.2. Стальные гибкие связи

Только с появлением стальных канатов стало возможным создание новых механизмов и машин, которое было бы невозможным при использовании канатов из натуральных растительных волокон. Обладая большой прочностью, проволочные канаты могут передавать значительно большие нагрузки и выдерживать рабочие напряжения. Как отмечал С. Свенсон [199, с. 30], когда-то пенька помогла освоению мирового океана, затем стальные тросы привели к индустриализации морских плаваний. Нержавеющие стальные тросы помогли сделать новый шаг в освоении морских просторов.

Рассмотрим историю появления и использования стального каната.

Стальной канат (канат проволочный) — состоит из большого числа проволок, винтообразно, определённым образом свитых в пряди, которые в свою очередь свиты вокруг сердечника, изготовленного из растительного волокна или (реже)

из проволоки [211, с. 600] (рис. 1.55). Стальные канаты изготовляют из проволоки, имеющей различную прочность при растяжении [197, с. 504].

При выборе предела прочности проволоки для каната нельзя руководствоваться только расчетным натяжением каната. Не всегда канат, выполненный из более прочной проволоки, лучше каната, изготовленного из проволоки, имеющей меньшее временное сопротивление разрыву.

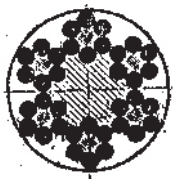


Рис. 1.55. Поперечное сечение проволочного каната [13, с. 18]

Историческая справка. Витые стальные канаты были впервые предложены в 1827 г. горным советником Клаустальского округа (Германия) В. Альбертом [218, с. 449]. Они заменили в горном деле железные цепи и пеньковые канаты, что позволило повысить безопасность работ и увеличить глубину проходки шахт. Первая машина для свивки стальных канатов была изобретена и применена в 1840 г. в Банска-Штявнице (Словакия). До 80-х гг. XIX в. не было специальных работ, посвященных конструированию и производству стальных канатов. Впервые стройное учение о рудничных стальных канатах разработал (конец XIX – начало XX вв.) известный чешский учёный инженер Й. Грабак (его книга «Проволочные канаты» была издана на русском языке в 1936 г.) [213]. Большую роль в совершенствовании стальных канатов и развитии их производства сыграли труды русского горного инженера К. Ю. Милковского, опубликовавшего в 1898 г. книгу «Проволочный канат в теории и горной практике». В ней была впервые дана формула для определения отношения диаметра барабана подъёмной машины к диаметру проволоки рудничного стального каната. Вопросами расчёта подъёмных стальных канатов занимался также известный русский учёный инженер И. А. Тиме [218].

Первые стальные канаты, подобно пеньковым канатам, свивали вручную из 12 железных проволок, каждая диаметром 3,5 мм. Затем стальные канаты стали быстро совершенствоваться и, благодаря большой прочности и гибкости, относительно малому весу и надёжности в эксплуатации, получили весьма широкое распространение во многих отраслях промышленности.

Начало промышленного использования стальных канатов следует отнести к 1834 г., когда впервые в мировой практике в рудничном подъеме взамен пенькового был применен витой сталепроволочный канат [12, с. 94].

От трехпрядных канатов конструкции 3×4 уже к 1840 г. перешли к четырехпрядным 4×4. Затем выработался конструктивный тип, близкий к современному (6×6+7о.с.), который применялся до 1860 г. Первые стальные канаты имели одностороннюю свивку, но вскоре были вытеснены канатами крестовой свивки.

Первые канаты изготовляли по образцу пеньковых: трехпрядными с тремя или четырьмя проволоками в прядях диаметром 3,5 мм и с низким временным сопротивлением материала проволок (400–500 МПа) [12, с. 7]. В 70-е гг. XIX столетия появились канаты с числом проволок, большим 36 (из прядей конструкции 3+9, 4+10 и 0+6+12). Тогда же начали изготавливать многопроволочные «покрытые» пряди конструкций (3+9)+15, (4+10)+16, (0+6+12)+18, применявшиеся в качестве

несущих, затем канаты тройной (кабельтовой) свивки конструкции 6×6×6 и прядеспиральные конструкции n (6 + 1 о.с.), где $n > 9$ [130, с. 94].

Спиральные канаты по сравнению с канатами двойной свивки обладают большими металлоемкостью и площадью опорной поверхности, но их применение ограничивается тем, что оборванные проволоки легко выплетаются из каната и препятствуют его дальнейшей работе. Улучшить контактную поверхность и обеспечить «замок» для оборванных проволок несущих канатов позволило создание в конце 90-х гг. прошлого века в Германии и во Франции канатов закрытой конструкции [131].

Улучшение механических свойств канатов с описанного периода осуществлялось исключительно за счет изменения качества канатных материалов. Стремление улучшить контактную поверхность и обеспечить «замок» для оборванных проволок несущих спиральных канатов привело в конце девяностых годов XIX века к созданию в Германии и во Франции канатов закрытой конструкции, получивших название закрытых канатов [12, с. 8].

В 1898 г. для одного из мостов в Праге были применены интересные по конструкции семипрядные канаты, в качестве прядей и сердечника которых использованы закрытые канаты диаметром 42 мм, состоящие из 1–6 круглых, двух слоев клиновидных и одного слоя Z-образных проволок [218].

Завод «Красный Гвоздильщик» в Ленинграде изготовлял канаты авиационные (для расчалки ферм самолетов, для управления элеронами, рулями поворота и высоты, жалюзями радиатора и проч.) [99]. В это время изготовлялись:

1) канаты простого плетения (спиральной свивки), состоящие из 6-ти прядей, каждая с числом проволок 7, 19, 37 или 61 — при диаметре проводок от 0,23 до 1,13 мм с пеньковым, асбестовым или железным сердечником;

2) канаты двойного плетения (жесткие), состоящие из 7 прядей, по 7 проволок каждая, без сердечника, диаметр проволок от 0,21–1,25 мм;

3) канаты двойного плетения (мягкие), состоящие из 6-ти прядей и 1-го сердечника, диаметр проволоки от 0,19–0,35 мм.

Как отмечал В. М. Шанников [99, с. 22], по сравнению с пеньковыми, канаты из стальной проволоки получили в краностроении предпочтительное применение. Допуская большие напряжения, проволочные канаты, при совершенно бесшумной и плавной работе, позволяют применение высоких рабочих скоростей. Надзор за их исправным состоянием осуществляется очень легко, так как уменьшение прочности канатов происходит постепенно, по мере обрыва отдельных проволок, что легко обнаруживается при систематических наружных осмотрах канатов. Для крановых канатов, работающих в горячих цехах, сердечник изготовлялся из асбеста или железных проволок.

В Таблицах № 4, 5, 6 [99, с. 22] содержатся подробные данные о стандартных сталепроволочных подъемных канатах, изготовляемых заводами СССР в 20-е годы XX в., с указанием предельных разрывающих нагрузок. В качестве материала, применяемого для проволочных канатов, использовалась термически обработанная тигельная сталь с временным сопротивлением $\sigma_в$ от 14000 до 19000 кг/см^2.

Что касается канатов двойной свивки, то вначале были созданы различные канаты с точечным касанием проволок в прядях (типа ТК), затем — канаты с линейным (ЛК) и смешанным точечно-линейным (ТЛК) касанием и, наконец, — канаты со взаимным касанием всех проволок пряди по спиральным поверхностям (Replate all Facial-contacted Rope). Эти канаты и способ их изготовления были предложены в 1953 г. английским инженером Р. Э. Кэмпбеллом и запатентованы Британской канатной компанией (British Ropes Ltd.) в Великобритании, США, ФРГ, Бельгии, Нидерландах, Японии и некоторых других странах [131, с. 95].

В 1959 г. указанной выше компанией было запатентовано изобретение Д. П. Харрена на дальнейшее усовершенствование конструкции обжатых прядей, направленное, главным образом, на уравновешивание свивочных напряжений в пряди [131, с. 96]. В том же году японская фирма «Шова» запатентовала изобретение Хитоми Такахаси — способ изготовления канатов из обжато-крученых прядей. Кроме канатов, представляющих по структуре модификацию канатов типа ЛК с прядями конструкции 1+6, 1+6+6/6, 1+9+9 и некоторых других, в проспекте фирмы «Шова» приведен, в частности, прядеспиральный канат конструкции 19×7 из обжатых прядей. По расположению проволок в слоях прядей канаты выполняются с линейным, точечным или комбинированным касанием проволок и соответственно обозначаются ЛК, ТК и ЛТК, или ТЛК.

К середине XX в. разработан ряд конструкций специальных стальных канатов:

– с линейным касанием проволок, не раскручивающихся после обрубки конца (в таких стальных канатах проволоки перед свивкой специально деформируются для снятия упругих напряжений);

– некрутящихся с подвешенным к ним грузом; закрытых и других сложных конструкций, например, тяговые и подъёмные канаты мощных экскаваторов.

Изготовление канатов с линейным касанием проволок в прядях было прежде затруднено из-за отсутствия методов расчёта их геометрических параметров. В конце 40-х гг. XX в. в СССР были разработаны сначала графические, а затем и аналитические методы конструирования стальных канатов, в частности — с линейным касанием проволок [193, с. 450]. Считалось, что с установкой многокатушечных прядевьющих машин стальные канаты с линейным касанием проволок в прядях должны найти ещё более широкое применение и вытеснить стальные канаты точечным касанием.

Металлические (стальные) канаты (рис. 1.56) изготовляют из непокрытой светлой или покрытой цинком или алюминием проволоки круглого или фасонного сечений с пределом прочности на растяжение $\delta_в$ = 900–3500 Мн/м^2 (90–350 кгс/мм^2) [224, с. 318].

Сечение стальных канатов может быть круглым, шестигранным, прямоугольным, квадратным. Витые круглые канаты (рис. 1.57) могут иметь различную свивку: одинарную спиральную (или одна прядь), выполняются открытого, полузакрытого и закрытого типа; двойную (тросовую) из круглых или фасонных (трёхгранных, овальных и др.) прядей (от 3 до 8); тройную (кабельтовую) из каната тросовой свивки (стренг).

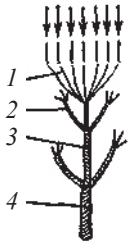


Рис. 1.56. Схема кручёного каната:
1 — проволока, пряжа (каболки); *2* — прядь (спиральный канат); *3* — тросовый канат; *4* — кабельтовый канат

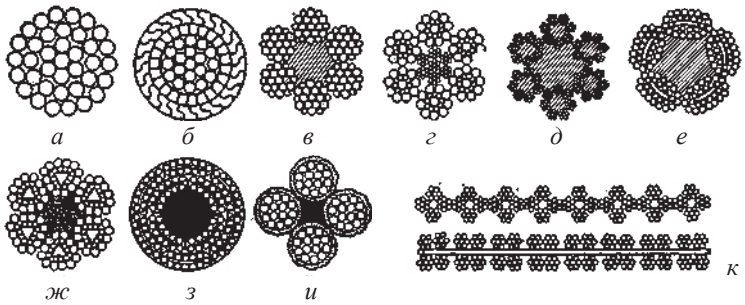


Рис. 1.57. Поперечное сечение канатов:
а — спирального открытого типа; *б* — спирального закрытого типа; *в* — двойной свивки с волокнистым сердечником; *г* — двойной свивки с металлическим сердечником; *д* — тройной кабельтовой свивки; *е* — фасонного овальнопрядного; *ж* — трёхграннопрядного; *з* — плоскопрядного; *и* — комбинированного; *к* — плоского

Классификация стальных канатов, предложенная М. А. Букштейном по конструктивным признакам и по видам используемых в канатах проволок, приведена в Приложении 2 [190]. Стальные канаты по признакам и назначению классифицируются на грузовые и грузолюдские, по механическим свойствам проволоки высшей марки, первой марки и второй марки. Канаты выпускаются из проволоки с цинковым покрытием для работы в агрессивных средах и без покрытия.

В зависимости от вида свивки прядей канаты изготовляют раскручивающимися, нераскручивающимися, малокрутящимися (число прядей может быть от 18 до 31 с противоположным направлением свивки по отдельным слоям). Направление свивки прядей канатов выбирают правое (обозначение Z) и левое (S); сочетание направлений свивок (рис. 1.58) отдельных элементов и канатов в целом может быть крестовое правое (SZ) и крестовое левое (ZS), одностороннее правое (ZZ) и одностороннее левое (SS).

Кручёные круглые канаты имеют диаметр до 100 мм. Комбинированные витые канаты изготовляют из пеньки и стали. В этом случае стальные пряди покрывают слоем пеньковых каболок или пластмассой [224, с. 318]. Невитые канаты (рис. 1.59) состоят из плотно уложенных групп стальных проволок или спиральных канатов, обжатых спиральной обмоткой или зажимами. Такие канаты обычно собирают на месте применения, они могут иметь диаметр до 1,5 м. Разрывное усилие невитых канатов в зависимости от диаметра достигает 1000 МН.

Плетёные канаты (рис. 1.60) изготовляют переплетением чётного числа (обычно 4) прядей, из которых половина имеет направление плетения правое, а другая — левое. Поперечное сечение таких канатов — квадратное. Плоские канаты состоят из чётного числа стренг (от 4 до 12) с чередующейся (правой и левой) свивкой, скрепленных (прошитых) прядями или стержнями, имеют прямоугольное сечение. Ширина таких канатов до 250 мм.

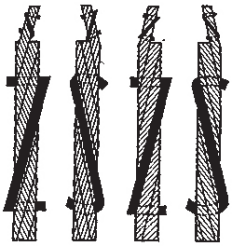


Рис. 1.58. Металлические канаты различной свивки: SZ — крестовой правой; ZS — крестовой левой; ZZ — односторонней правой; SS — односторонней левой



Рис. 1.59. Невитой канат с обмоткой



Рис. 1.60. Металлический плетеный канат

Как отмечалось в [218, с. 450], в отдельных стальных канатах (например, для подвесных мостов) число проволок доходило до 17 500; диаметр каната — до 1500 мм; прочность на разрыв — до 96000 т. Ранее стальные канаты изготовляли из стальной углеродистой холоднотянутой светлой или оцинкованной проволоки, обычно диаметром от 0,3 до 4 мм. Сталь для проволоки содержала 0,45–0,85% C, при наличии не более 0,04% S и 0,04% P. Предел ее прочности при растяжении 110–210 кг/мм, а в специальных случаях — до 350 кг/мм. Канатная проволока должна, кроме того, обладать высокой вязкостью, выдерживать при испытании большое число перегибов и скручиваний. Свойства эти достигаются главным образом термической обработкой — патентированием в процессе волочения.

По числу повивов каната различают стальные канаты одинарной свивки (спиральные), двойной (тросы) и тройной (кабели). Спиральные стальные канаты свиваются непосредственно из проволок в один или несколько концентрических слоев (проволоки свиты по спирали в один или в несколько рядов) (рис. 1.61) [218, с. 450]. Такие канаты применяются как поддерживающие — для расчалки мачт и труб, для подвески мостов и кабелей, для стоячего такелажа; как несущие — для подвесных канатных дорог и кабель-кранов.

Трос двойной свивки, подобно растительным тросам тросовой работы, состоит из нескольких прядей, чаще всего шести, свитых вокруг одного общего сердечника, который может быть растительным или металлическим. При двойной свивке сначала из проволок свиваются отдельные спиральные канаты — пряди, которые, в свою очередь, свиваются в канат — трос (рис. 1.62) [218, с. 450]. При тройной свивке полученные двойной свивкой канаты (в этом случае они называются стренгами) свиваются в более толстый канат — кабель (трос кабельной работы) (рис. 1.63) [193, с. 450].

Пряди могут иметь круглое (чаще), плоское, овальное и трёхгранное сечение. По направлению проволок в прядях и прядей в канате различают свивку одностороннюю и крестовую. При односторонней свивке винтовое направление проволок и прядей одинаковое — либо левое, либо правое; при крестовой свивке оно противоположное. Стальные канаты односторонней свивки более износостойки, но стремятся раскручиваться. Их применяют в подъёмных устройствах с жёсткими направляющими для груза.

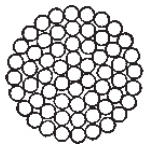


Рис. 1.61. Канат одинарной свивки (спиральный)

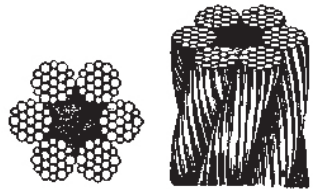


Рис. 1.62. Канат двойной свивки (трос)

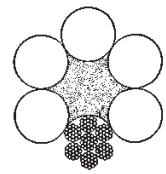


Рис. 1.63. Канат тройной свивки (кабель)

Стальные канаты изготовляются как с одним, так и с несколькими сердечниками (рис. 1.64) [218, с. 450].

Стальные канаты с несколькими сердечниками отличаются большей гибкостью, а потому особенно пригодны для обвязки леса в плотах и для бегучего такелажа. По форме сечения проволоки различают стальные канаты, изготовленные из проволоки только круглой и из проволоки фасонной (частично).

Стальные канаты из круглых проволок одинакового или различного диаметра имеют наибольшее распространение. Стальные канаты с внешним слоем (иногда с двумя и более слоями) проволок фасонного сечения, иначе называемые закрытыми (рис. 1.65), имеют гладкую цилиндрическую поверхность, что увеличивает их стойкость против истирания [218]. Благодаря большей плотности (их сечение близко к сплошному) и прочности закрытые стальные канаты с успехом применяют при больших нагрузках в качестве несущих для подвесных канатных дорог и кабель-кранов и в качестве направляющих — на шахтных подъёмниках. По характеру взаимного касания проволок в пряди различают:

1. стальные канаты с точечным касанием, изготовляемые из проволок одинакового диаметра, с различным в разных слоях шагом свивки;

2. стальные канаты с линейным касанием, изготовляемые из проволок различного диаметра с одинаковым во всех слоях шагом свивки.

Канаты с точечным касанием проволок (крестовой свивки, с одним растительным сердечником) широко применяются в подъёмно-транспортных машинах и при бурении нефтяных скважин. Стальные канаты с линейным касанием проволок более совершенны, отличаются лучшим коэффициентом использования поперечного сечения с повышенной износостойкостью. Последнее их свойство обусловлено тем, что при линейном касании проволок устраняется вредное их пересечение в смежных слоях, в результате чего значительно уменьшается внутреннее трение.

Классификация стальных канатов рассмотрена в [12, 23, 35, 46, 99, 123, 131, 142, 158, 165, 172, 176, 185, 190, 195, 201, 202, 218, 273, 274].

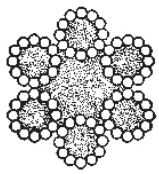


Рис. 1.64. Канат с несколькими сердечниками

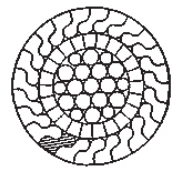


Рис. 1.65. Закрытый канат

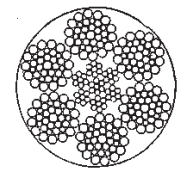


Рис. 1.66. Канат сложной конструкции

В [131, с. 94] предложена схема, иллюстрирующая эволюцию стальных канатов. Авторы разработали её с целью создания и освоения принципиально новых в канатном производстве канатов из деформированных прядей и технологии их изготовления (рис. 1.67).

Из анализа эволюции круглопрядных стальных канатов можно проследить некоторую общую тенденцию всех разновидностей этих канатов к развитию линейного касания агрегата проволок в их касание по поверхности. Так, пряди линейного касания и некоторые другие привели к созданию прядей поверхностного касания, которым по аналогии с прядями ЛК можно присвоить индекс ПК.

Автором предлагается следующая классификация стальных канатов [396]. Данная классификация является более полной и основывается на разработанных ранее классификациях, однако расширена и дополнена по целому ряду признаков.

В 80-е годы XX в. тросы изготовляли из оцинкованной стальной проволоки [199, с. 29]. Оцинковка в большой степени увеличивает надежность троса, так как предохраняет его от коррозии. Однако со временем на блоках и кнехтах цинковое покрытие стирается и трос начинает ржаветь под воздействием соленой воды. Трение проволок друг о друга при изгибе троса приводит к стиранию цинка внутри троса. Для оцинкованных тросов лучше всего подходит минеральное масло (консистентная смазка для защиты от коррозии). Для старых тросов, на которых стерт цинковый слой, хорошо подходят льняное масло, тюлений или китовый жир.

В [199, с. 31] приведены примеры расчета максимальной рабочей прочности троса. При этом следует исходить из квадрата диаметра, который нужно умножить на 18 — для стальных тросов без растительных волокон, или на 14 — для стальных тросов с растительными волокнами, оплетающими сердечник; на 12 — для стальных тросов с растительным сердечником; на 8 — для стальных тросов с растительными волокнами, вплетенными в пряди. Такие расчеты гарантируют пятикратный запас прочности.

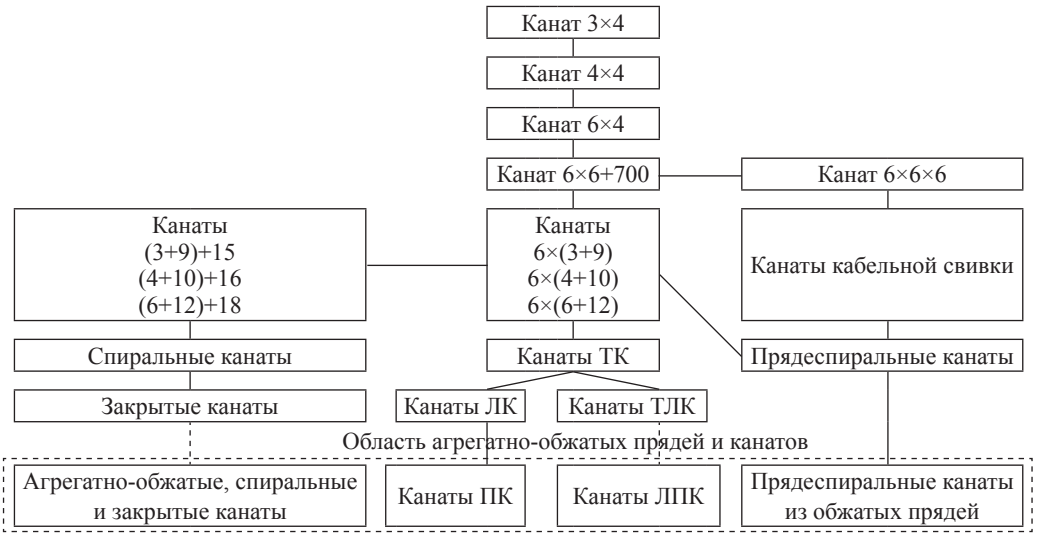


Рис. 1.67. Эволюция стальных круглопрядных канатов [131]

Употребляются и более подробные формулы для полной характеристики троса. В этом случае после основной части записи, показанной выше, указывается диаметр троса, предел прочности проволоки, кгс/мм^2, сорт проволоки (В, I, II), качество цинкового покрытия («лс», «сс», «жс»), номер соответствующего ГОСТа.

Стальные тросы, по требованию заказчика, могут выпускаться любой длины (но не менее 200 м). При отсутствии специальных указаний о длине троса они обычно выпускаются длиной 250, 500, 750 м. Относительное удлинение стальных тросов составляет не более 3%. Характерными свойствами каната являются способность к раскручиванию со свободного конца и кручение при продольных деформациях. Раскручивание каната предотвращается предварительной деформацией (преформированием), то есть приданием проволоке формы винтовой линии, соответствующей ее положению в канате перед навивкой, а также различной по направлению свивкой проволок в пряди и прядей в канат двойной свивкой (крестовая свивка).

Прядеспиральные канаты также можно изготовлять из обжатых прядей. Как отмечали М.Ф. Глушко, В.К. Скалацкий, И.А. Шилин, все ветви развития стальных круглопрядных канатов ведут в область агрегатно-обжатых прядей и канатов. Вне этой области остаются пока закрытые спиральные канаты [131, с. 96].

Поиски новых конструктивных форм канатов в целях уменьшения контактных напряжений выражаются также в эволюции круглопровочных круглых прядей в фасонные из круглых проволок и далее — в фасоннопроволочный трёхгранник (рис. 1.68) [23, 24, 131]. Несмотря на эксплуатационные преимущества фасоннопрядных канатов, их производство в 1966 г. составило всего 0,16% от общего выпуска. Это объясняется сложностью технологии, которая определяется многооперационным процессом получения пряди фасонного сечения и укладки фасоннопиральной пряди в канат, а также сложностью и нестабильностью скручивания такой пряди.

Стремление к лучшему использованию поперечного сечения стальных канатов, к созданию конструкций канатов с гладкой поверхностью, необходимых для работы ряда подъемно-транспортных механизмов (несущие канаты канатных дорог, шахтный вертикальный подъем) привело к построению однопрядных стальных канатов закрытой (рис. 1.69, *а*) и полузакрытой конструкции (рис. 1.69, *б)* с использованием в них проволок различных сечений (круглых, трапецеидальных, зетобразных, двояковогнутых иксобразных) [190].

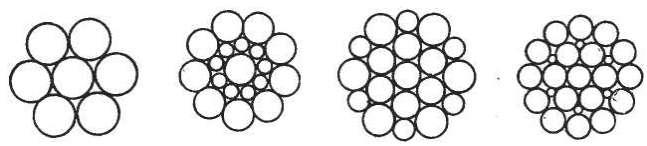


Рис. 1.68. Стандартные пряди типа ЛК и соответствующие им круглые радиально-обжатые пряди конструкций:
а — 1 + 6; *б* — 1 + 9 + 9; *в* — 1 + 6 + 6/6; *г* — 1 + 6/6 + 12

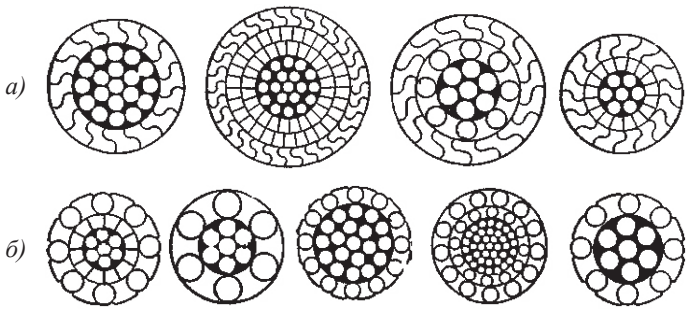


Рис. 1.69. Канаты закрытой (*а*) и полузакрытой (*б*) конструкций

Подбор проволок разных сечений наряду с другими свойствами дает возможность довести использование поперечного сечения каната до 90%. Закрытые и полузакрытые канаты имеют точечное касание круглых проволок между слоями и сплошное линейное касание фасонных и круглых проволок в слое, а также между слоями. Обязательным условием производства канатов этого типа до последнего времени считалось чередование (рис. 1.70) направлений свивки (правая, левая) отдельных слоев, число которых в отдельных канатах доходит до девяти [190].

К технологическим и эксплуатационным преимуществам канатов этой конструкции в горном деле можно отнести следующие [19]: гладкая наружная поверхность каната приводит к уменьшению трения и удельного давления между канатом и опорным башмаком; при разрыве наружных проволок они не выходят на поверхность и не развертываются, как в обычных открытых канатах; профилированные проволоки создают плотную поверхность каната, препятствующую проникновению влаги внутрь его, ржавлению внутренних проволок. При свивке закрытых и полузакрытых канатов внутренние проволоки покрывают густой смазкой, которая сохраняется вследствие малой проницаемости оболочки. Канаты закрытой и полузакрытой конструкции отличаются некрутящимися свойствами, они почти не дают остающихся удлинений.

Для построения стальных канатов могут быть использованы пряди не только круглого сечения, но также трехгранные, овальные и плоские, наряду с круглой проволокой применяются проволоки других сечений, металлические ленты и органические сердечники. Канаты, изготовленные из таких прядей, относятся к группе фасоннопрядных канатов.

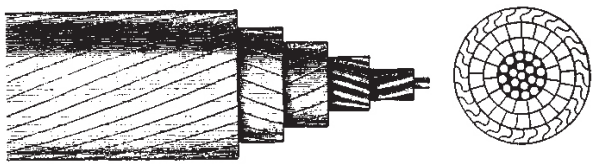


Рис. 1.70. Направление свивки отдельных слоёв канатов закрытой конструкции

Характеристика стальных канатов различных видов приведена в табл. 1.9 [224, с. 318].

Стальные канаты широко применяются во многих отраслях народного хозяйства: в строительстве, на транспорте, в рыбной, лесной, горнодобывающей промышленности, металлургии (табл. 1.10) [223, с. 318].

Канатное производство. Изготовление металлических канатов осуществляется на соответствующем технологическом оборудовании [224, с. 320–321]. Основные операции канатного производства: перемотка проволоки, пряжи на катушки на волочильных или намоточных станках; свивка (скручивание) прядей на прядевьющих машинах; свивка канатов на канатовьющем или плетельном оборудовании.

Таблица 1.9. Характеристика стальных канатов различных видов

Канаты	Диаметр, мм	Разрывное усилие, кН[1]
Спиральные открытые	0,65 – 34,4	0,44 – 965,0
Спиральные закрытые, несущие[2]	30,0 – 70,0	596,0 – 3950,0
Спиральные закрытые, подъёмные[2]	20,0 – 60,0	349 – 3751,0
Тросовые (ЛК) с волокнистым сердечником	2,2 – 63,0	2,62 – 2230,0
Тросовые (ЛК) с металлическим сердечником	1,9 – 61,0	2,41 – 2460,0
Трёхграннопрядные[2]	18,0 – 43,5	203,5 – 1405,0
Некрутящиеся	3,5 – 68,0	7,08 – 3255,0

[1] *Примечание:* 1 кН = 1000 кГс.

[2] *Примечание:* данные о разрывном усилии приведены на основе суммарной прочности проволоки.

Таблица 1.10. Применение металлических канатов различных видов

Канаты	Применение
Спиральные открытые	Ванты, арматура строительных конструкций, технических изделий, грозозащитные тросы высоковольтных передач
Спиральные закрытые	Канатные дороги, шахтные подъёмники
Тросовые, крестовые	Подъёмные, транспортные механизмы и машины, буровые установки, лесозаготовка
Тросовые, односторонние	Фуникулёры, наклонные шахтные подъёмники
Тросовые фасоннопрядные	Шахтные подъёмники с многоканатным подъёмом
Кабельные многостренговые	Морской и речной транспорт (швартовные, буксирные устройства)
Комбинированные	Орудия тралового лова
Невитые	Арматура строительных конструкций, подвесные канатные мосты
Плоские	Шахтные подъёмники (подклетьевые), проходческое оборудование шахт (подъёмные)
Плетёные	Грузоподъёмные устройства (исключают вращение поднимаемого груза)

Процесс изготовления стальных канатов состоит из трёх основных операций: перемотки проволоки на катушки намоточных станков, свивки прядей на прядевьющих и канатов на канатовьющих машинах [218, с. 451; 17, 123, 142]. После испытаний (на растяжение, перегиб и скручивание) и сортировки канатная проволока в мотках перематывается на катушки, устанавливаемые в количестве до 8 штук на особых намоточных станках. Диаметр катушек определяется в первую очередь диаметром наматываемой на них проволоки. Для получения канатов нужной длины концы проволоки отдельных мотков при намотке на катушку соединяются медной пайкой внахлёстку (устарелый способ) или стыковой электросваркой. Намоточные станки новых конструкций снабжены электросварочным аппаратом, а также автоматическим устройством для выключения после того, как на катушки намотана проволока заданной длины.

Производство металлических канатов осуществляют на прядевьющих и канатовьющих машинах, которые имеют одинаковые кинематические схемы и отличаются только размером и числом зарядных катушек (от 3 до 48). На раме (стойке) машины (рис. 1.71) [218] размещается сердечник (металлический или волокнистый), вокруг которого должны свиваться проволоки или пряди.

Свивающий орган машины имеет шаблон для распределения проволок или прядей и преформатор для получения нераскручивающихся прядей или канатов. В формирующем обжимном механизме с плашками образуется конус свивки прядей или канатов и происходит их опрессовка. Для рихтовки изделий предназначен роличный механизм, из которого изделие тяговым и приёмным механизмами подаётся для намотки на катушки или барабаны.

В зависимости от конструкции свивающего органа различают машины двух типов: роторные (корзиночные), в которых катушки в рамах размещаются между отдельными дисками и принимают участие в его вращении, и трубчатые (сигарные), в которых зарядные катушки располагаются в дебалансированных каретках последовательно внутри трубы-сигары (по её оси), не вращаются вместе с трубой. В обоих случаях катушки вращаются вокруг своих осей под действием силы, возникающей при стягивании проволок, каболок или прядей тяговым механизмом. В роторных машинах сердечник проходит внутри полого вала ротора, а в трубчатых — по внутренней поверхности трубы. Направление свивки определяется изменением направления вращения свивального органа, а шаг свивки — соответ-

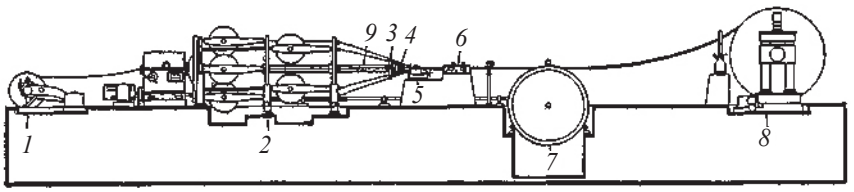


Рис. 1.71. Прядеканатовьющая роторная машина:

1 — рама; *2* — ротор-корзина; *3* — распределительный шаблон; *4* — роликовый преформатор; *5* — обжимной механизм с плашками; *6* — рихтовальный механизм; *7* — тяговый механизм; *8* — приёмный механизм; *9* — полый вал

ствующим подбором частоты вращения свивального органа и окружной скорости тягового механизма. Трубчатые машины имеют большую производительность по сравнению с роторными и некоторыми канатовьющими машинами при изготовлении канатов диаметром до 20 мм. Плетёные и плоские канаты изготовляют на специальных машинах и станках-тележках. Невитые канаты монтируются потребителями на месте применения.

Основные технологические параметры. На технологию изготовления каната влияют такие параметры, как шаг свивки, характер касания проволок в прядях и прядей в канате, направление и угол свивки, число прядей и др. [223, с. 320-321]. Шаг свивки проволок в прядях для канатов с точечным касанием (ТК) не должен превышать 11 расчётных диаметров круглых или фасонных прядей; в канатах с линейным касанием (ЛК) — 9 диаметров, в шестипрядных канатах — не более 6,5 диаметра, в фасоннопрядных — 7,5; в канатах тройного кручения — 7, а в стренгах плоского каната — 16 диаметров.

Пряди канатов с точечным касанием изготовляют одно- и многослойными. Число слоев проволок в прядях не превышает 5, общее число проволок доходит до 61, иногда — до 91. Каждый слой в канатах ТК свивается при одинаковых углах свивки, а в ЛК — при разных, обычно в одну сторону. Спиральные канаты имеют чередующееся направление свивки для всех или части слоев, число которых доходит до 10. Пряди в канатах с линейным касанием (число слоев не более 3) изготовляют за одну технологическую операцию с числом проволок не более 48, которые свиваются в одну сторону. Углы свивки относительно оси пряди для канатов ТК находятся в пределах 12–15°, для канатов ЛК — 16–20° (для наружного слоя). Угол свивки прядей в канат выбирают близким по величине к углу свивки проволок в прядях. Для изготовления канатов односторонней свивки на канатовьющих машинах устанавливается планетарная передача, которая сообщает вращение рамам с зарядными катушками и обеспечивает подкрутку прядей для сохранения плотности их свивки.

Историческая справка. Ранее катушки с проволокой устанавливали на прядевьющие машины. Принцип их действия состоит в том, что сматываемой с катушек проволоке придаётся одновременно поступательное и вращательное движение. Вращение производится вокруг сердечника, перемещающегося только поступательно. В результате, проволоки, проходя в зажимных плашках, свиваются в прядь по винтовой линии. Прядь, пройдя тяговое колесо прядевьющей машины, наматывается на катушку. Катушки с намотанными на них прядями передаются на канатовьющие машины подъёмными кранами. Канатовьющие машины по принципу действия не отличаются от прядевьющих. По конструкции прядевьющие и канатовьющие машины делятся на сигарные (рис. 1.72) [218, с. 451], с расположением катушек вдоль оси машины, и корзиночные (горизонтальные или вертикальные), в которых катушки расположены по окружности.

Это даёт возможность значительно увеличить число оборотов и производительность сигарной машины по сравнению с производительностью корзиночной. Так, корзиночные прядевьющие машины делают до 200, канатовьющие — до 100 об/мин; сигарные прядевьющие — до 1200, канатовьющие — до 500 об/мин.

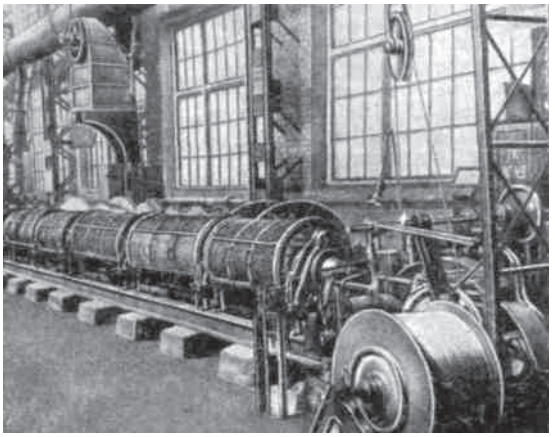


Рис. 1.72. Сигарная машина.
Расположение в сигарных машинах катушек не по окружности, а последовательно вдоль оси машины исключает действие центробежной силы

Количество катушек, какие могут быть установлены на прядевьющей машине, определяет максимальное число проволок в получаемой пряди; оно доходит при свивке в одну операцию примерно до 36. При многоразовом пропуске через прядевьющую машину можно получить пряди со значительно большим числом проволок. Точно так же количество катушек на канатовьющей машине, доходящее до 12, определяет максимальное число прядей в канате. Нераскручивающиеся стальные канаты изготовляются на обычных машинах, но с приспособлением (рис. 1.73) [218, с. 451] для предварительного деформирования прядей, реже — проволоки.

Применяются также особые роликовые аппараты для деформирования готового каната. Перед свивкой стального каната сердечники из растительного волокна пропитывают антикоррозионной и противогнилостной смазкой, не содержащей ни кислот, ни щелочей. Подвергаются смазке и стальные канаты. Готовые стальные канаты перед отправкой потребителям наматывают на деревянные барабаны, изготовленные из хорошо высушенного дерева. Внутренние поверхности барабана, соприкасающиеся с канатом, для предохранения его от коррозии покрывают олифой. Каждый стальной канат снабжается актом (сертификатом) с указанием механических свойств каната и химической стойкости защитного покрытия.

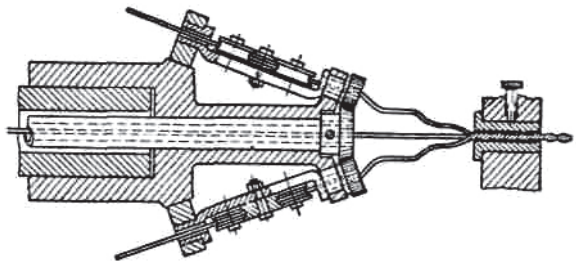


Рис. 1.73. Приспособление для деформирования прядей и проволоки

1.3.3. Гибкие связи из искусственных и синтетических волокон и материалов

Наряду с натуральными текстильными волокнами, образующимися в природе в различных частях растений, из кожи животных, в минералах и т. п., широко применяют химические, изготовляемые заводским путём. Бурное развитие химии и особенно химии искусственных материалов привело к появление искусственных материалов для изготовления канатов и тросов, кабель-тросов, позволило получить ГС с новыми свойствами.

Как отмечается в [215, с. 13], волокна искусственные и синтетические (ВИиС) — тонкие, прочные, легко деформируемые нити, получаемые путём переработки вязких концентрированных растворов или расплава высокомолекулярных соединений, молекулы которых состоят из большого числа атомов или групп атомов, — радикалов, соединённых друг с другом химическими силами. Молекулярный вес этих соединений обычно превышает 20000–40000, а иногда достигает 500000–1000000. Помимо высокого молекулярного веса, вещества, применяемые для получения ВИиС, должны обладать особым строением: вытянутой формой молекул; кроме того, они должны хорошо растворяться в доступных растворителях или легко плавиться без разложения. Исходным материалом для получения искусственного волокна являются природные высокомолекулярные соединения (целлюлоза, белки). Для производства синтетических волокон используются высокомолекулярные соединения, получаемые путём химического синтеза, что даёт возможность широко изменять в требуемом направлении свойства получаемых волокон.

Указанные виды ВИиС могут быть подразделены на несколько групп.

Искусственные волокна:

а) получаемые из целлюлозы и её эфиров — вискозное, медно-аммиачное и ацетатное волокно;

б) из белков — казеиновое волокно и волокно из растительных белков.

Синтетические волокна:

а) получаемые из полиамидов — капрон, найлон и др.;

б) из винильных полимеров — хлорин, виньон (сополимер хлорвинила и винилацетата) и др.

Исходным материалом для получения синтетических волокон являются различные типы синтетических полимеров, удовлетворяющие указанным выше требованиям [210, с. 15]. Имелись все необходимые предпосылки для широкого развития производства этих полимеров путём использования продуктов переработки нефти (этилен), карбида кальция (ацетилен) или древесины (спирт, фурфурол). Производство синтетических волокон значительно увеличивало сырьевую базу для получения волокон и одновременно вело к расширению ассортимента готовых изделий.

Волокна химические, волокна, получаемые из органических природных и синтетических полимеров [222, с. 324]. В зависимости от вида исходного сырья химические волокна подразделяются на синтетические (из синтетических поли-

меров) и искусственные (из природных полимеров). Иногда к химическим волокнам относят также волокна, получаемые из неорганических соединений (стеклянные, металлические, базальтовые, кварцевые).

Химические волокна выпускают в промышленности в виде:

1) моноволокна (одиночное волокно большой длины);

2) штапельного волокна (короткие отрезки тонких волокон);

3) филаментных нитей (пучок, состоящий из большого числа тонких и очень длинных волокон, соединённых посредством крутки). Филаментные нити в зависимости от назначения разделяются на текстильные и технические, или кордные нити (более толстые нити повышенной прочности и крутки).

Историческая справка. Возможность получения химических волокон из различных веществ (клей, смолы) предсказывалась ещё в XVII и XVIII вв., но только в 1853 г. англичанин Аудемарс впервые предложил формовать бесконечные тонкие нити из раствора нитроцеллюлозы в смеси спирта с эфиром, а в 1891 г. французский инженер И. де Шардонне впервые организовал выпуск подобных нитей в производственном масштабе [222, с. 324]. С этого времени началось быстрое развитие производства химических волокон. В 1896 г. освоено производство медноаммиачного волокна из растворов целлюлозы в смеси водного аммиака и гидроокиси меди. В 1893 г. англичанами Кроссом, Бивеном и Бидлом предложен способ получения вискозных волокон из водно-щелочных растворов ксантогената целлюлозы, осуществлённый в промышленном масштабе в 1905 г. В 1918–20 гг. был разработан способ производства ацетатного волокна из раствора частично омыленной ацетилцеллюлозы в ацетоне, а в 1935 г. организовано производство белковых волокон из молочного казеина. Произвоство синтетических волокон началось с выпуска в 1932 г. поливинилхлоридного волокна (Германия). В 1940 г. в промышленном масштабе выпущено наиболее известное синтетическое волокно — полиамидное (США). Производство в промышленном масштабе полиэфирных, полиакрилонитрильных и полиолефиновых синтетических волокон осуществлено в 1954–60 гг.

Свойства. Волокна химические часто обладают высокой разрывной прочностью до [1200 Мн/м^2 (120 кгс/мм^2)], разрывным удлинением, хорошей формоустойчивостью, несминаемостью, высокой устойчивостью к многократным и знакопеременным нагрузкам, стойкостью к действиям света, влаги, плесени, бактерий, хемо- и термостойкостью. Физико-механические и физико-химические свойства химических волокон можно изменять в процессах формования, вытягивания, отделки и тепловой обработки, а также путём модификации как исходного сырья (полимера), так и самого волокна. Это позволяет создавать даже из одного исходного волокнообразующего полимера химические волокна, обладающие разнообразными текстильными и др. свойствами (табл. 1.11) [222, с. 325].

Производство. Для производства химических волокон из большого числа существующих полимеров применяют лишь те, которые состоят из гибких и длинных макромолекул, линейных или слаборазветвлённых, имеют достаточно высокую молекулярную массу и обладают способностью плавиться без разложения

Таблица 1.11. Основные свойства химических волокон

Вид волокна		Плотность, г/см^3	Прочность			Удлинение, %		Набухание в воде, %	Влагопоглощение при 20°С и 65% относительной влажности, %
			сухого волокна, кгс/мм^3	мокрого волокна	волокна в петле	сухого волокна	мокрого волокна		
				% от прочности сухого					
Искусственные волокна									
Ацетатное (текстильная нить)		1,32	16–18	65	85	25–35	35–45	20–25	6,5
Триацетатное штапельное волокно		1,30	14–23	70	85	22–28	30–40	12–18	4,0
Вискозные волокна	штапельное обычное	1,52	32–37	55	35	15–23	19–28	95–120	13,0
	штапельное высокопрочное	1,52	50–60	75	40	19–28	25–29	62–65	12,0
	штапельное высокомолекулярное	1,52	50–820	65	25	5–15	7–20	55–90	12,0
	текстильная нить обычная	1,52	32–37	55	45	15–23	19–28	95–120	13,0
	текстильная нить высокопрочная	1,52	25–82	80	35	12–16	20–27	65–70	13,0
Медноаммиачные волокна	штапельное волокно	1,52	21–26	65	70	30–40	35–50	100	12.5
	текстильная нить	1,52	23–32	65	75	10–17	15–30	100	12,5
Синтетические волокна									
Полиамидное (капрон)	текстильная нить обычная	1,14	46–64	85–90	85	30–45	32–47	10–12	4,5
	текстильная нить высокопрочная	1,14	74–86	85–90	80	15–20	16–21	9–10	4,5
	штапельное волокно	1,14	41–62	80–90	75	45–75	–	10–12	4,5
Полиэфирное (лавсан):	текстильная нить обычная	1,38	52–62	100	90	18–30	18–30	3–5	0,35
	текстильная нить высокопрочная	1,38	80–100	100	80	8–15	8–15	3–5	0,35
	штапельное волокно	1,38	40–58	100	40–80	20–30	20–30	3–5	0,35
Полиакрилонитрильное (нитрон)	техническая нить	1,17	46–56	95	72	16–17	16–17	2	0,9
	штапельное волокно	1,17	21–32	90	70	20–60	20–60	5–6	1,0
Поливинилспиртовое штапельное волокно		1,30	47–70	80	35	20–25	20–25	25	3,4
Поливинилхлоридное штапельное волокно		1,38	11–16	100	60–90	23–180	23–180	0	0
Полипропиленовое волокно	текстильная нить	0,90	30–65	100	80	15–30	15–30	0	0
	штапельное волокно	0,90	30–49	100	90	20–40	20–40	0	0
Полиуретановая нить (спандекс)		1,0	5–10	100	100	500–1000	500–1000	–	1,0

или растворяться в доступных растворителях. Такие полимеры принято называть волокнообразующими. Процесс состоит из следующих операций [210, с. 325]:

1) приготовления прядильных растворов или расплавов;

2) формования волокна;

3) отделки сформованного волокна.

Приготовление прядильных растворов (расплавов) начинают с перевода исходного полимера в вязкотекучее состояние (раствор или расплав). Затем раствор (расплав) очищают от механических примесей и пузырьков воздуха и вводят в него различные добавки для термо- или светостабилизации волокон, их матировки и т. п. Подготовленный таким образом раствор или расплав подаётся на прядильную машину для формования волокон. Формование волокон заключается в продавливании прядильного раствора (расплава) через мелкие отверстия фильеры в среду, вызывающую затвердевание полимера в виде тонких волокон. В зависимости от назначения и толщины формуемого волокна количество отверстий в фильере и их диаметр могут быть различными [210, с. 325].

При формовании химических волокон из расплава полимера (например, полиамидных волокон) средой, вызывающей затвердевание полимера, служит холодный воздух. Если формование проводят из раствора полимера в летучем растворителе (например, для ацетатных волокон), такой средой является горячий воздух, в котором растворитель испаряется (т.н. «сухой» способ формования). При формовании волокна из раствора полимера в нелетучем растворителе (например, вискозного волокна) нити затвердевают, попадая после фильеры в специальный раствор, содержащий различные реагенты, т.н. осадительную ванну («мокрый» способ формования). Скорость формования зависит от толщины и назначения волокон, а также от метода формования. При формовании из расплава скорость достигает 600–1200 м/мин, из раствора по «сухому» способу — 300–600 м/мин, по «мокрому» способу — 30–130 м/мин.

Прядильный раствор (расплав) в процессе превращения струек вязкой жидкости в тонкие волокна одновременно вытягивается (фильерная вытяжка). В некоторых случаях волокно дополнительно вытягивается непосредственно после выхода с прядильной машины (пластификационная вытяжка), что приводит к увеличению прочности химических волокон и улучшению их текстильных свойств [222, 372].

Из методов растворения самой целлюлозы при приготовлении прядильного раствора практическое применение получил только метод растворения целлюлозы в медно-аммиачном растворе — комплексном соединении гидрата окиси меди и аммиака $Cu(NH_3)_4(OH)_2$. Этот способ положен в основу производства медно-аммиачного волокна.

В большинстве случаев для получения прядильных растворов применяют эфиры целлюлозы. Наибольшее распространение получило производство искусственного волокна из ксантогената целлюлозы — сложного эфира целлюлозы и дитиоугольной кислоты. Из эфиров целлюлозы, не разлагающихся в процессе формования волокна, широкое применение получили уксуснокислые эфиры, ко-

торые используются для производства ацетатного волокна. Эти эфиры, т. н. ацетилцеллюлоза, растворяются только в органических растворителях (ацетон, смесь ацетона и спирта и др.), как и большинство синтетических полимеров, применяемых для получения волокон.

Отделка химических волокон заключается в обработке свежесформованных волокон различными реагентами. Характер отделочных операций зависит от условий формования и вида волокна. При этом из волокон удаляются низкомолекулярнные соединения (например, из полиамидных волокон), растворители (например, из полиакрилонитрильных волокон), отмываются кислоты, соли и др. вещества, увлекаемые волокнами из осадительной ванны (например, вискозными волокнами). Для придания волокнам таких свойств, как мягкость, повышенное скольжение, поверхностная склеиваемость одиночных волокон и др., их после промывки и очистки подвергают авиважной обработке или замасливанию. Затем волокна сушат на сушильных роликах, цилиндрах или в сушильных камерах. После отделки и сушки некоторые химические волокна подвергают дополнительной тепловой обработке — термофиксации (обычно в натянутом состоянии при 100–180 °С), в результате которой стабилизируется форма пряжи, а также снижается последующая усадка как самих волокон, так и изделий из них во время сухих и мокрых обработок при повышенных температурах.

Мировое производство химических волокон развивается быстрыми темпами. Это объясняется, в первую очередь, экономическими причинами (меньшие затраты труда и капитальных вложений) и высоким качеством химических волокон по сравнению с природными волокнами. В 1968 г. мировое производство химических волокон достигало 36% (7,287 млн т) от объёма производства всех видов волокон [222, с. 325].

Химические волокна в различных отраслях в значительной степени вытесняют натуральный шёлк, лён и даже шерсть. К 1980 г. производство химических волокон достигло 9 млн т, а к 2000 г. — 20 млн т в год и сравнялось с объёмом производства природных волокон. В СССР в 1966 г. было выпущено около 467 тыс. т, а в 1970 г. 623 тыс. т. [222, с. 325].

Вопросам производства искусственных и синтетических волокон, которые послужили сырьём для производства искусственных и синтетических тканей, ГС, посвящена обширная литература. Процесс производства искусственных волокон рассмотрен в [17, 55, 80, 155, 210–217, 371, 372]. Применение искусственных и синтетических волокон в различных отраслях народного хозяйства рассматривается в следующих источниках: в лёгкой промышленности для производства волокон [20, 55, 73, 118, 155], в морехозяйственном комплексе [8, 11, 12, 14, 31–33, 35, 41, 53, 56, 58, 63, 69, 89, 98, 121, 122, 125, 128, 136–139, 141, 143, 145, 155, 158–160, 162, 167, 169, 176, 183, 193, 194, 199], в военно-морском и торговом флоте [10, 12, 20, 107, 111, 119, 149, 254, 309, 311], других отраслях и видах деятельности [3, 29, 34, 39, 85, 102, 126, 253–256, 273, 274].

Волокна искусственные — химические волокна, получаемые из природных органических полимеров [222, с. 323]. К волокнам искусственным относятся ви-

скозные волокна, медноаммиачные волокна, ацетатные волокна, белковые искусственные волокна. Вискозные и медноаммиачные волокна, состоящие из гидратцеллюлозы, называются также гидратцеллюлозными. Сырьём для производства вискозных, медноаммиачных и ацетатных волокон служит целлюлоза, выделяемая из древесины; медноаммиачные и ацетатные волокна часто получают из хлопковой целлюлозы (хлопкового пуха и подпушка). Для получения белковых волокон используют белки растительного или животного происхождения (например, зеин, казеин). Волокна искусственные формуют из растворов полимеров по сухому или мокрому способу и выпускают в виде текстильной или кордной нити, а также штапельного волокна. К недостаткам вискозных, медноаммиачных и белковых волокон относятся значительная потеря прочности в мокром состоянии и лёгкая сминаемость. Однако благодаря хорошим гигиеническим свойствам, дешевизне и доступности исходного сырья производство вискозного волокна продолжает развиваться. Растёт также выпуск ацетатных волокон, обладающих рядом ценных качеств (несминаемость, хороший внешний вид). Белковые волокна вырабатываются в небольших количествах и выпуск их постепенно уменьшается.

Мировое производство искусственных волокон в 1968 г. составляло 3527,2 тыс. т (ок. 48,4% от общего выпуска химических волокон). Впервые выпуск химических волокон в промышленном масштабе организован в 1891 г. во Франции [222, с. 323].

Волокна синтетические, химические волокна, получаемые из синтетических полимеров [222, с. 324]. В. с. формуют либо из расплава полимера (полиамида, полиэфира, полиолефина), либо из раствора полимера (полиакрилонитрила, поливинилхлорида, поливинилового спирта) по сухому или мокрому методу. Синтетические волокна выпускают в виде текстильных и кордных нитей, моноволокна, а также штапельного волокна. Разнообразие свойств исходных синтетических полимеров позволяет получать синтетические волокна с различными свойствами, тогда как возможности варьировать свойства искусственных волокон очень ограничены, поскольку их формуют практически из одного полимера (целлюлозы или её производных). Синтетические волокна характеризуются высокой прочностью, водостойкостью, износостойкостью, эластичностью и устойчивостью к действию химических реагентов [372]. Производство синтетических волокон развивается более быстрыми темпами, чем производство искусственных волокон. Это объясняется доступностью исходного сырья и быстрым развитием сырьевой базы, меньшей трудоёмкостью производственных процессов и особенно разнообразием свойств и высоким качеством синтетических волокон. В связи с этим синтетические волокна постепенно вытесняют не только натуральные, но и искусственные волокна в производстве некоторых товаров народного потребления и технических изделий.

В 1968 г. мировое производство синтетических волокон составило 3760,3 тыс. т (ок. 51,6% от общего выпуска химических волокон). Впервые выпуск синтетических волокон в промышленном масштабе организован в середине 30-х гг. XX в. в США и Германии.

Шёлк и штапельное волокно. Искусственное волокно может быть получено в виде кручёных нитей бесконечной длины (искусственного шёлка) или в виде коротких некручёных волоконец, нарезанных в пучки (штапельки) определённой длины (штапельного волокна) [234, с. 16]. Длина штапельного волокна подравнивается к длине хлопкового или шерстяного волокна.

Искусственный шёлк является самостоятельным текстильным материалом, который может применяться для изготовления разнообразных текстильных изделий в ткачестве и трикотаже, а также для изготовления корда.

Штапельное волокно применяется преимущественно в чистом виде, а также в смеси с хлопком или шерстью и затем проходит с этими волокнами весь цикл операций на прядильной фабрике. Условия приготовления прядильных растворов при формовании шёлка и штапельного волокна в основном одинаковы. Для прядения штапельного волокна применяются фильеры со значительно большим числом отверстий, чем для прядения искусственного шёлка. Если при прядении шёлка применяются фильеры на 24–100 отверстий, то при прядении штапельного волокна число отверстий в фильере доходит до 2000–12000, что обусловливает значительное увеличение производительности прядильной машины.

Из общего количества произведённого в 1949 г. искусственного волокна 61% составлял искусственный шёлк и 39% — штапельное волокно [210, с. 16]. Стоимость штапельного волокна примерно в 2 раза ниже стоимости искусственного шёлка. Вопрос о целесообразности производства искусственного шёлка или штапельного волокна решается соотношением мощностей прядильных и ткацких фабрик и вырабатываемым ассортиментом изделий.

Основными показателями качества искусственного волокна являются его прочность и эластичность. Удельная прочность волокна характеризуется обычно разрывной длиной в километрах. Разрывная длина искусственного волокна составляет 15–20 км [205, с. 17]. Метрический номер определяет тонину волокна, т. е. число метров волокна в 1 г. Чем толще волокно, тем больше его титр, тем меньше метрический номер. Элементарное волокно искусственного шёлка имеет метрический номер 6000–3000, что соответствует толщине волокна в 20–40 микрон. Тонину волокна искусственного шёлка часто выражают также через титр в денье. Титром называется вес 9000 м волокна, выраженный в граммах. Если 9000 м волокна весят 1 г, то титр волокна равен 1 денье. Удельная прочность волокна выражается также в граммах на 1 денье. Нормальная прочность вискозного волокна составляет 1,8–2,2 г/денье.

Путём изменения отдельных параметров технологического процесса и улучшения качества сырья крепость волокна может быть повышена в 2–3 раза (получение т.н. высокопрочного искусственного волокна), что особенно существенно при получении кордного волокна.

Вискозное волокно. Сырьём для получения вискозного волокна является древесная целлюлоза. Технологический процесс получения вискозного волокна начинается с мерсеризации целлюлозы — обработки её концентрированным рас-

твором едкого натра. В результате получается новое химическое соединение — щелочная целлюлоза [210, с. 17].

Процесс мерсеризации проводится в специальных ваннах-прессах, где целлюлоза в листах замачивается в течение 30–60 мин. в 18%-ном растворе едкого натра, после чего листы щелочной целлюлозы отжимаются от избытка щёлочи гидравлическим прессом при давлении 300 атм. Отжатая щелочная целлюлоза измельчается в специальных аппаратах-измельчителях для увеличения её активной поверхности и ускорения последующего взаимодействия с сероуглеродом.

Полученное вискозное волокно подвергается дополнительной обработке с целью удаления выпавшей на волокне серы (десульфурация). В случае необходимости волокно отбеливается.

Основным преимуществом, обеспечивающим наиболее широкое производство вискозного волокна, является доступность и дешевизна сырья. Основными реагентами для получения вискозного волокна, кроме древесной целлюлозы, являются едкий натр, сероуглерод и серная кислота. Все эти материалы являются продуктами крупного промышленного производства, более доступны и дёшевы, чем реагенты, применяемые для производства искусственного волокна по любому другому методу.

Вискоза (ксантогенат целлюлозы), вещество, получаемое обработкой целлюлозы раствором едкого натра и сероуглеродом. В. образует вязкий коллоидный раствор, который после созревания продавливается через фильеры или узкие щели в разбавленную серную кислоту. При этом целлюлоза выделяется в форме тонких нитей или плёнки. Из первых получают вискозный шёлк, из вторых — целлофан [206, с. 309].

Вискозный шёлк, искусственный шёлк, получаемый из целлюлозы, превращенной химической обработкой в вискозу. Вискозный шёлк — наиболее распространённый тип искусственного волокна. Значительная часть всей продукции искусственного шёлка получается по вискозному способу.

Ацетатное волокно. Для получения прядильного раствора ацетилцеллюлоза растворяется в ацетоне или в смеси ацетона со спиртом. Полученный вязкий раствор, содержащий 20–25% ацетил-целлюлозы, после фильтрации и удаления воздуха применяется для получения волокна [210, с. 18]. Формование ацетатного волокна производится по сухому способу. Скорость прядения по сухому способу выше, чем по мокрому, и составляет 150–250 м/мин. Полученное ацетатное волокно не требует дополнительной отделки и после крутки и размотки может непосредственно применяться для текстильной переработки. Ацетатный шёлк более гидрофобен, чем вискозное волокно, и отличается хорошими электроизоляционными качествами.

Синтетические волокна. Наибольшее промышленное распространение получили полиамидные волокна и волокна, изготавливаемые из перхлорвинила или сополимеров хлорвинила с хлорвинилиденом, акрилонитрилом, винилацетатом и др., а с 1948 г. находят практическое применение волокна из других типов поливинильных соединений.

Полиамидное волокно получается из синтетических высокомолекулярных полиамидных смол. Промышленное производство волокна первого типа начато в 1940 г. [210]. В последующие годы производство этого волокна непрерывно увеличивается. Наибольшее распространение в промышленности нашли два типа полиамидных волокон — капрон и найлон. Исходным материалом для получения полиамидных смол является преимущественно фенол.

Получение синтетического волокна из полиамидной смолы существенно отличается от методов производства всех других типов искусственных и синтетических волокон [210, с. 18]. Полиамидная смола растворяется только в ограниченном количестве растворителей (крезол, муравьиная кислота, концентрированные минеральные кислоты), использование которых для получения прядильных растворов технологически и экономически нецелесообразно. При получении полиамидного волокна его формование осуществляется из расплава. Измельчённая полиамидная смола в виде крошки расплавляется и переходит без разложения в текучее состояние. Подготовка смолы, плавление и фильтрация происходят в среде инертного газа (азота). Расплавленная смола при 260–280°С продавливается прядильным насосиком через фильтр, а затем и фильеру. Вытекающие из фильеры тонкие струйки расплавленной смолы попадают в камеру (шахту), где, охлаждаясь током холодного воздуха, постепенно застывают и затем наматываются на бобину. Полиамидное волокно прядут со скоростью 500–800 м/мин.

Получаемое на прядильной машине волокно обладает сравнительно невысокой крепостью и чрезвычайно большим удлинением (300–400%). В таком виде оно не может быть использовано. Для получения волокна с требуемыми физико-механическими свойствами предварительно подкрученное волокно подвергается на специальной крутильно-вытяжной машине дополнительной вытяжке в 3,5–4 раза.

Высокая прочность, эластичность и упругость полиамидного волокна, устойчивость его к истиранию и сминанию определяют значительные преимущества этого вида волокна не только по сравнению с хлопком и вискозным шёлком, но и по сравнению с натуральным шёлком.

Благодаря своим высоким физико-механическим свойствам полиамидные волокна находят всё более широкое применение не только для производства высококачественных чулочных изделий, но и для ответственных технических целей: нити высокой прочности идут на изготовление корда для авиапокрышек и особо прочных парашютов. Недостатком полиамидных волокон в качестве сырья для текстильной промышленности является пониженная гигроскопичность этих волокон, что затрудняет их использование на изготовление тканей и трикотажа (кроме чулок). Этот недостаток может быть устранён при получении новых типов полиамидных смол, содержащих гидрофильные группы.

Сравнительные данные о физико-механических свойствах разных видов натуральных, искусственных и синтетических волокон приводятся в табл. 1.12 [210, с. 19].

Таблица 1.12. Физико-механические свойства ВииС [210]

№	Название волокна	Крепость (разрывная длина), км		Удлинение, %	
		в сухом состоянии	в мокром состоянии	в сухом состоянии	в мокром состоянии
1.	Вискозный шёлк	15–18	7–9	18	22
2.	Высокопрочный вискозный шёлк	27–30	15–20	10	12
3.	Ацетатный шёлк	11–14	6–7	22	24
4.	Казеиновое волокно	7–9	2,7–3,5	25	30
5.	Перхлорвиниловое волокно (хлорин)	18–27	18–27	16	18
6.	Полиамидное волокно	36–54	32–50	16	20

Как видно из данных таблицы, синтетическое полиамидное волокно по основным показателям превосходит натуральные волокна и другие виды искусственных волокон. Вискозный высокопрочный шёлк приближается по физико-механическим показателям к хлопковому волокну, превосходя его по другим свойствам (тонина, мягкость).

Полихлорвинил получается путём полимеризации хлорвинила. Из всех синтетических полимеров этот продукт, содержащий в молекуле около 55% хлора, является наиболее доступным. Исходным сырьём для получения хлорвинила является этилен и хлор или ацетилен [210, с. 18]. Непосредственное применение полихлорвинила для получения синтетического волокна не представляется возможным, т. к. температура разложения полихлорвинила ниже, чем температура его плавления. Прядение полихлорвинилового волокна из растворов также затруднено ввиду плохой растворимости этого полимера в доступных органических растворителях.

Получение вязких концентрированных растворов было достигнуто при применении вместо полихлорвинила продуктов совместной полимеризации хлорвинила с другими винильными соединениями или продуктов дополнительного хлорирования полихлорвинила. При содержании в сополимере 15–20%, винилацетата растворимость продукта резко повышается. Для сополимера хлорвинила и винилацетата возможно получить 15–25%-ные растворы в ацетоне. Из этих растворов по методу сухого прядения получается синтетическое волокно.

Для производства синтетического волокна за последние годы получили практическое применение также и продукты совместной полимеризации хлорвинила или винилиденхлорида с другими соединениями, в частности с нитрилом акриловой кислоты [210, с. 19]. Повышение растворимости полихлорвинила может быть достигнуто также путём изменения его состава, в частности путём повышения содержания в нём хлора. При дополнительном хлорировании полихлорвинила содержание хлора повышается с 55 до 65%. Хлорированный полихлорвинил (т.н. хлорин) растворяется значительно лучше, чем полихлорвинил, что даёт возможность получить концентрированные прядильные растворы перхлорвиниловой смолы в ацетоне. Из хлорированного полихлорвинила получается синтетическое волокно хлорин.

Почти все синтетические волокна, получаемые из полимерных винильных соединений, являются термопластичными продуктами с температурой размягчения ок. 80–120°С. Это обстоятельство, а также крайне низкая гигроскопичность значительно ограничивают область их применения. Использование их в качестве текстильных материалов пока не представляется возможным. Эти волокна могут применяться только для изготовления декоративных тканей или для технических целей, где специфические свойства этих волокон представляют большой интерес. Волокна и получаемые из них ткани, благодаря их высокой устойчивости к действию кислот и щелочей, применяются в качестве фильтровальных материалов в химической и других отраслях промышленности. Устойчивость к действию бактерий (незагниваемость) и высокая механическая прочность дают возможность с успехом применять их, так же как и полиамидные волокна, для изготовления рыболовных сетей. Низкая гигроскопичность определяет целесообразность использования этих волокон в качестве электроизоляционных материалов. Для расширения областей применения поливинильных волокон и, в частности, для использования в качестве текстильных волокон необходимо повысить их гигроскопичность и термостойкость. Эта задача должна быть решена синтезом новых типов винильных полимеров.

Особое место среди текстильных волокон занимают стекловолокно и нити, широко применяемые в технике для электро-, тепло-, звуко- и др. видов изоляции, в виде фильтровальных материалов, несгораемых изделий, в производстве стеклопластиков и др.

Волокно стеклянное (ВС) — искусственное волокно, изготовляемое различными способами из расплавленного стекла [210]. Диаметр стеклянного волокна в зависимости от его назначения колеблется в пределах от 3 до 30 μ (3–300 мкм). Различают два основных вида стеклянного волокна:

1) текстильное волокно (3–10 μ) для переработки в пряжу и ткань, которое может быть получено непрерывным (длиной до 20 км) и штапельным (коротким, длиной от 5 до 50 см);

2) теплоизоляционное волокно (стекловойлок и стеклянная вата 3–30 μ), которое также может быть непрерывным и штапельным.

В современной технике пользуются тремя основными методами получения стеклянного волокна:

1) вытягиванием — из расплавленной стекломассы и из стеклянных стержней (штабиков);

2) центробежным разделением струи стекломассы;

3) выдуванием.

Основные физико-технические свойства волокнистых материалов: длина, толщина, прочность, влажность и плотность волокна.

Наиболее широко в отечественном рыболовстве применяют капрон, обладающий достаточно высокой прочностью и стойкостью к механическому износу. Его разрывная длина составляет 60–75 км [189]. При намокании прочность капронового волокна снижается на 10–12%. Разрывное удлинение достигает 16–20%. Плотность капрона составляет 1,14 г/см^3. Вторым представителем гетерогенных

является лавсан, который по качественным показателям уступает капрону: разрывная длина 40–50 км, разрывное удлинение — 12–15%, относительно высокая плотность (1,38 г/см^3), более низкая износоустойчивость. Из карбоцепных наиболее перспективно полипропиленовое волокно. Разрывная длина этого волокна достигает 12–15%. Полипропилен несколько уступает капрону по износоустойчивости и термостойкости. Плотность полипропилена наименьшая среди всех волокнистых материалов и составляет 0,91 г/см^3. Кроме волокон, у которых диаметр поперечного сечения составляет несколько десятков микрон, широко используются мононити (диаметром 0,3–1,0 мм) из капрона, полипропилена, полиэтилена и др.

Асбест — минеральные текстильные волокна — применяют для выработки пряжи, служащей для производства технических (негорючих, фильтровальных и др.) тканей [222, с. 324]. Асбест (греч. asbestos, букв. — неугасимый, неразрушимый) — название, объединяющее группу тонковолокнистых минералов из класса силикатов, образующих агрегаты, сложенные тончайшими гибкими волокнами [220, с. 309–310]. Этими свойствами обладают минералы двух групп — серпентина и амфибола, известные под названием хризотил-асбеста и амфибол-асбеста, различные по атомной структуре. По химическому составу асбестовые минералы — водные силикаты магния, железа и отчасти кальция и натрия. Наибольшее значение имеет хризотил-асбест (95% всего используемого асбеста).

Хризотил-асбест — минерал из группы серпентина, состав $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$; двухслойный листовой силикат. Один слой состоит из кремнекислородных тетраэдров, другой — из кислородных октаэдров с магнием (иногда с железом) в центре. Цвет в куске зеленовато-серый. Блеск шелковистый. Твердость по минералогической шкале 2–2,5, плотность 2500 кг/м^3. Волокна гибки, обладают высокой прочностью на разрыв [около 3 ГН/м^2 (300 кгс/мм^2)], высокой огнестойкостью ($t_{пл}$ ок. 1500°С), плохо проводят тепло и электричество. Длина волокон варьирует от долей мм до 50 мм, редко более, толщина — доли мкм. Месторождения образуются в ультраосновных породах, богатых магнезией, при воздействии гидротермальных растворов, связанных с более молодыми гранитами. В СССР добывался на Урале (Баженовское и Киембаевское месторождения), в западной части Казахстана (Джетыгаринское), в Тувинской республике (Ак-Довуракское). За рубежом крупные месторождения хризотил-асбеста известны в Канаде (провинция Квебек) и Южной Африке (ЮАР); кроме того, он добывается в Чехии, Китае, США, Италии, Франции, Финляндии, на Кипре, в Японии. Хризотил-асбест идёт на изготовление несгораемых текстильных изделий, теплоизоляционных изделий.

Амфибол-асбесты представлены минералами из групп амфибола (тремолитом, антофиллитом, крокиоолитом и др.). Амфибол-асбест — агрегат тонких волосовидных кристаллов, расположенных параллельно, радиально-лучисто и беспорядочно. Волокна некоторых амфибол-асбестов — хрупкие. Окраска и другие физические свойства зависят от его состава. Длина волокон до 5 см, но часто и больше. Месторождения амфибол-асбеста приурочены к метаморфическим породам: на Урале (Сысертское), в ЮАР. Амфибол-асбест обладает высокой кислотоупорностью и устойчивостью по отношению к морской воде и в то же время — хороший

материал для огнестойких и теплоизоляционных изделий. Наибольшее применение имеет в химической промышленности как наполнитель.

Выпускается свыше 3000 различных материалов и изделий с применением асбеста (асбестотехнические, асбестоцементные и асбестотеплоизоляционные материалы и изделия). Асбест классифицируется в зависимости от длины волокна (от 0,25 мм до 18–25 мм) по 8 сортам — 0 и 1–7-й сорта.

Историческая справка. В глубокой древности из асбестового волокна вырабатывали несгораемые фитили для светильников, одежду для жрецов. Искусство изготовления асбестовых тканей было известно в Др. Греции, Китае, Индии, Иудее. Добыча асбеста в крупных промышленных масштабах была начата в Канаде в 70-х гг. XIX в. В России асбестовая промышленность начала развиваться с конца XIX в., когда в промышленности стали всё шире использоваться средние и коротковолокнистые сорта асбеста для производства различного рода термостойких асбестовых изделий, а также асбестоцементных строительных материалов. Этому способствовало открытие в 1885 г. крупнейшего в мире Баженовского месторождения асбеста на Урале (Свердловская обл.), промышленная разработка которого началась в 1889 г. В 1913 г. более половины добываемого в России асбеста вывозилось за границу, а асбестовые изделия импортировались. Асбестовая промышленность СССР, по существу, была создана за годы советской власти. Начатые после Октябрьской революции восстановительные работы на рудниках и фабриках завершены в 1928 г., когда выпуск асбеста превзошёл уровень 1913 г. и достиг 25,4 тыс. т. В годы довоенных пятилеток 1929–40 гг. проведены значительные работы по реконструкции Баженовских рудников и построены новые крупные обогатительные фабрики №2 и №3. Сложные горногеологические условия месторождения и сравнительно низкое содержание асбеста в руде (в среднем 2,64%) обусловливают необходимость переработки до 55–60 т горной массы на 1 т асбеста всех сортов. В 1964 г. мощности комбината «Туваасбест» были увеличены до 20 тыс. га — в основном для удовлетворения потребности в высших (текстильных) сортах асбеста [220].

Базальт (лат. basaltes, basanites, от греч. basanos — пробный камень; по другой версии, — от эфиоп. basal — железосодержащий камень), магматич. горная порода [220, с. 522]. В составе базальта преобладает плагиоклаз (лабрадор); присутствуют пироксены, оливин, магнетит, титанит, апатит и др. Химический состав близок к габбро, которое является глубинным его аналогом. Почти полностью кристаллические базальты называются долеритами. Базальты широко распространены среди вулканогенных толщ всех возрастов. В СССР добыча базальта велась на Кавказе, Украине (окрестности Ровно). Базальт — хороший строительный материал; используется для производства щебня и штучного камня, для облицовки сооружений. Б. прочен, хорошо поддаётся шлифовке. Поэтому его издавна применяют для скульптуры (древний Египет, Ассирия, поздний Рим, Византия, современная Армения). Базальт легко плавится. Плавленый базальт используют при изготовлении кислотоупорной химической аппаратуры, труб, электроизоляторов сильного тока, специального волокна.

Прочностная характеристика канатов различных видов приведена в табл. 1.13 [224, с. 318].

Таблица 1.13. Характеристика неметаллических канатов различных видов

Канаты	Диаметр, мм	Разрывное усилие, кН[1]
Хлопчатобумажные	3,0 – 8,0	0,4 – 3,0
Полипропиленовые	7,9 – 28,7	7,0 – 48,0
Капроновые	7,9 – 63,7	11,8 – 592,0

[1] *Примечание:* 1 кН = 1000 кГс.

1.3.4. Комбинированные гибкие связи

Сведения о видах якорных цепей, строении и типах судовых канатов даны в [8, 12, 31, 32, 35, 46, 53, 56–58, 96, 99, 100, 125, 128, 172, 176, 183, 186, 195, 199–202, 206]. Поэтому рассмотрим лишь особые разновидности канатов и приведем общие рекомендации по применению канатов всех видов в судовых устройствах.

Повышенные требования предъявляются к канатам, которые применяют при буксировке, спуске и подъеме подводных приборов, устройств и аппаратов. Такие канаты должны сочетать большую прочность с высокой стойкостью к коррозии, коррозионному растрескиванию и перегибам. Однако обычные стальные канаты с цинковым покрытием и новые канаты с алюминиевым покрытием имеют недостаточную долговечность.

Большая стойкость и долговечность у канатов с проволокой из нержавеющей стали, покрытой купроникелем. Это покрытие также препятствует обрастанию каната. Еще более высокая стойкость у канатов с проволоками из никелевого сплава. Весьма эффективно покрытие стальных канатов пластмассовой оболочкой из полиуретана или полиэтилена.

Особая разновидность канатов — грузонесущие кабели, или кабель-тросы. Это стальные, уравновешенные относительно скручивающих моментов многослойные канаты, внутри которых пропущены изолированные проводники. По проводникам передают электрические сигналы от приборов буксируемых или спускаемых аппаратов, буев, управляющие сигналы, подводится энергия к устройствам и системам.

Схематическое изображение конструкции грузонесущих кабелей представлено на рис. 1.74 [172, с. 63]. Грузонесущий элемент выполнен в виде двухслойной спиральной проволочной брони *1* с взаимно противоположным направлением повивов. Проволока из маломагнитной нержавеющей или углеродистой стали имеет диаметр 4 – 4,5 мм.

Электрическую часть кабеля составляют силовые *4* и служебные *5*, *6* токопроводящие жилы, которые бывают экранированные *4*, *5* и неэкранированные *6*. Число жил может быть более сотни. Жилы покрыты полиэтиленовой, фторопластовой и другой электроизоляцией. Очень тщательно изолируют жилы от воды: оплеткой прорезиненной тканевой лентой *7*, пластмассовой оболочкой *8*. Общий

пучок токопроводящих элементов имеет оплетку из прорезиненной ткани *2* и заключен в пластмассовую оболочку *3*, поверх которой навиты слои несущей проволоки [172, с. 63–64].

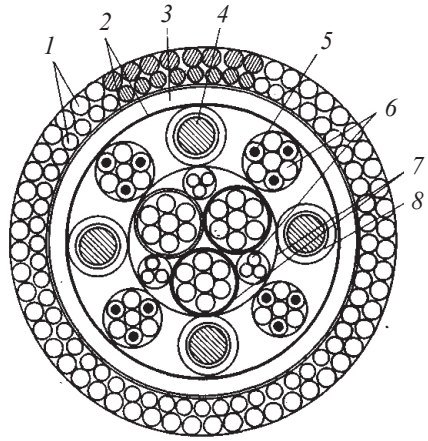


Рис. 1.74. Схематическое изображение конструкции грузонесущего кабеля

Среди синтетических канатов специального назначения от обычных отличаются так называемые параллельные каболки (американские канаты «юнилайн», «ноларо»). Они состоят из большого числа не скрученных нитей или пучков, заключенных в защитную пластмассовую оболочку или наружную оплетку. Эти канаты обладают более высокой, чем витые, прочностью и жесткостью при растяжении.

Очень высокую прочность и жесткость имеют канаты с параллельными каболками типа «кевлар», изготовленные из органических волокон с высоким модулем упругости. Были созданы канаты пенька-сталь («геркулес») и капрон-сталь, в той или иной мере сочетающие достоинства стальных, растительных и синтетических канатов [99]. Канаты пенька-сталь имеют более высокую, чем пеньковые, прочность, меньшее удлинение, а в сравнении со стальными — повышенную гибкость и безопасность при работе. Их рекомендуют применять на рыболовных судах. Прочностная характеристика комбинированных канатов приведена в табл. 1.14 [224, с. 318].

Таблица 1.14. Характеристика комбинированных канатов

Канаты	Диаметр, мм	Разрывное усилие, кН[1]
Пенька-сталь	8,0 – 32,0	8,9 – 112,7

[1] Примечание: 1 кН=1000 кГс.

Канаты капрон-сталь применяют как заменитель стальных тросов, обладающий высокой стойкостью к многократному изгибу, повышенной гибкостью, меньшей способностью к обмерзанию. Уменьшается вероятность травмирования рук работающих оборвавшимися проволоками. Применение таких комбинированных канатов пока ограничено.

Канаты комбинированные. Наибольшее распространение в Мировом промышленном рыболовстве получили четырех- и шестипрядные канаты типа «синтетика-сталь», у которых каждая прядь образована пучком стальных проволок диаметром 0,5–1,2 мм, обвитых синтетическими прядями [57, 189]. Ассортимент комбинированных канатов по диаметру составляет от 10 до 32 мм. Их используют во многих орудиях лова в качестве подбор, пожилин, урезов, каркасных элементов и т.д.

Говоря о комбинированных ГС, нельзя не сказать о кабелях дальней связи, прокладываемых по дну морей и океанов на глубинах до нескольких тысяч метров. Первый морской телеграфный одножильный кабель с гуттаперчевой изоляцией был проложен в 1850 г. через пролив Па-де-Кале (линия Дувр–Кале). Трансатлантический (между Ирландией и Ньюфаундлендом) телеграфный подводный кабель связи длиной 3750 км проложен в 1858 г. [230, с. 104]. Регулярная телеграфная связь по подводному кабелю между Европой и Америкой начала действовать в 1866 г. В нач. XX в. были проложены первые низкочастотные телефонные подводные кабели с. (симметричного типа). Использование (с 1943 г.) в подводных кабелях с. промежуточных усилителей позволило перейти к прокладке подводных линий связи практически неограниченной длины, а высокочастотное уплотнение линий — довести число каналов связи до 1000 и более. Первая трансатлантическая высокочастотная телефонная кабельная магистраль введена в эксплуатацию в 1956 г. В 1962–63 гг. сооружена транстихоокеанская магистраль между Канадой и Австралией (~15 тыс. км). Для прокладки подводного кабеля связи используют кабельные суда. К нач. 70-х гг. проложено 30 океанских телефонных кабельных линий общей длиной 140 тыс. км с 4170 промежуточными усилителями, и десятки кабельных линий в Северном, Балтийском, Средиземном, Чёрном и др. морях. Наряду со спутниками подводный кабель связи — основное средство межконтинентальной связи. По подводному кабелю можно одновременно осуществлять свыше 720 телефонных переговоров, т. е. они обеспечивают 720 каналов связи, занимающих общую полосу частот ~6 МГц. Для развития подводных кабельных магистралей связи характерна общая тенденция расширения спектра передаваемых частот и увеличения числа каналов связи. Так, в 1974 г. принята в эксплуатацию первая трансатлантическая 1840-канальная линия связи с общей полосой частот ~14 Мгц (между Великобританией и Канадой).

Подводный кабель связи — коаксиальный кабель со сплошной (как правило, полиэтиленовой) изоляцией [230, с. 104]. В глубоководных кабелях, прокладываемых на глубине более 700 м, наружная броня отсутствует, функцию несущего элемента выполняет стальной трос. Он сбалансирован от кручения и расположен в центре трубчатого внутреннего проводника.

Такие кабели, изобретённые в 1951 г. англ. инженером Р. Брокбанком, подразделяют на кабели среднего размера (диаметр внутреннего проводника 8 мм, внешнего 25 мм и большого (соответственно 8 и 38 мм) У последних существенно ниже потери и значительно больше возможное число каналов связи. Постоянный электрический ток для питания усилителей подводится по внутреннему прово-

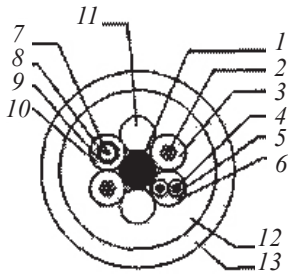


Рис. 1.75. Кабель подводный с нулевой плавучестью КП-1

днику подводного кабеля связи, вторым проводником тока служит морская вода. Мелководные, прибрежные и береговые подводные кабели связи имеют стальную броню с целью предотвращения обрывов при возможных зацеплениях тралами, якорями судов или трении о каменистый грунт во время приливов и отливов.

В качестве примера можно привести кабель подводный с нулевой плавучестью КП-1 (рис. 1.75) [446]. Кабель подводный с нулевой плавучестью имеет 2 силовых жилы, одну коаксиальную жилу и одну витую пару. Кабель обладает небольшим весом, не более 94 кг/м, и высокой прочностью (разрывное усилие не менее 2 кН). Кабель может быть использован в системах водолазного телевидения, а также в буксируемых телевизионных системах для подачи питания на подводную камеру и светильник и передачи видеосигнала на бортовой блок.

В табл. 1.15 приведены характеристики кабеля подводного с нулевой плавучестью КП-1.

Таблица 1.15. Характеристики кабеля подводного с нулевой плавучестью КП-1

№ п/п	Наименование элементов конструкции	Материал элемента конструкции, размеры	Диаметр, мм
1.	Грузонесущий элемент	Нить АРМОС (СВМ-жгут) 35×58,8 текс	2,1
2.	2 силовых жилы	Медь, 7×0,31 (0,5 мм^2)	0,9
3.	Изоляция силовых жил	Сополимер пропилена 02015-302КМ, D = 0,6 мм различного цвета	2,1
4.	Витая пара	Медь мягкая ММ 7×0,15 (0,12 мм^2)	0,45
5.	Изоляция витых пар	Сополимер пропилена 02015-302КМ, D = 0,25 мм различного цвета	0,95
6.	Оболочка витой пары	Сэвилен	2,1
7.	Токопроводящая жила коаксиала	Медь мягкая ММ 7×0,063	0,2
8.	Изоляция	Сополимер пропилена 02015-302КМ, D = 0,25 мм различного цвета	2,1
9.	Экран	Встречная оплетка 48×0,08 мм	1,32
10.	Оболочка	Сополимер пропилена 02015-302КМ, D = 0,4 мм различного цвета	2,1
11.	Заполнитель	Сополимер пропилена	2,1
12.	Промежуточная оболочка	ПВД107-02К вспененный D = 1,5	9,0
13.	Оболочка	ПВД 107-02К D = 1,1 различного цвета	11,0

Технические характеристики: электрические: электросопротивление силовых жил, не более: 40,5 Ом/км. Сопротивление изоляции силовой жилы, не менее: 10000 МОм/км. Эл. сопротивление проводника витой пары, не более: 170 Ом/км. Сопротивление изоляции проводника витой пары, не менее: 100 МОм/км. Волно-

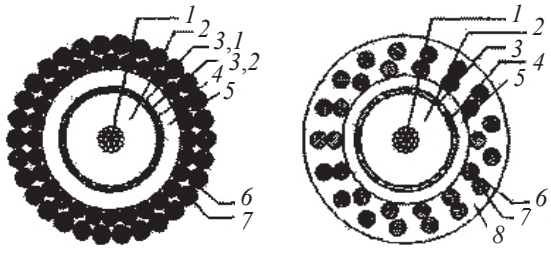
вое сопротивление витой пары на 1 МГц: 120±5% Ом. Коэффициент затухания витой пары на 1 МГц, не более: 20 дб/км. Эл. сопротивление центрального элемента коаксиальной пары: 860 Ом/км. Эл. сопротивление экрана коаксиального пары: 80 Ом/км. Волновое сопротивление коаксиальной пары: 75 Ом. Коэффициент затухания на частоте 100 МГц, не более: 0,52 дб/м. [446]. Механические: разрывное усилие, не менее: 2 кН. Масса кабеля не более: 94 кг/км. Расчетная плавучесть: 0±2 %.

Буксируемые кабельные системы. Кабели этой группы предназначены для питания и связи с глубоководными аппаратами и проведения спуско-подъемных операций, буксировки за судном различной аппаратуры и прочих подобных работ. Основную номенклатуру этой группы составляют грузонесущие бронированные кабели. На рис. 1.76 (*а* и *б*) приведены конструкции двух вариантов глубоководных коаксиальных кабелей КГП 1-190, один из которых выполнен с двухповивной броней из стальной проволоки, а другой имеет армированную оболочку [446].

В табл. 1.16 приведены характеристики глубоководных коаксиальных кабелей КГП 1-190.

Таблица 1.16. Характеристики глубоководных коаксиальных кабелей КГП 1-190

№ п/п	Наименование элементов конструкции	Материал элемента конструкции, размеры	Диаметр, мм	
			Вариант 1	Вариант 2
1.	Токопроводящая жила	Проволока медная мягкая 19×0,53 (4,0 мм^2)	2,6	2,6
2.	Изоляция	Полиэтилен низкого давления 271-70К, D = 3,2 мм	9,0	9,0
3.	Экран	1) Проволока медная мягкая 20×(4×0,26 мм); 2) Лента медная мягкая 9×(2,5×0,3 мм)	10,0	10,0
4.	Обмотка	Пленка ПЭТ-Э	10,2	10,2
5.	Изоляция экрана	Полиэтилен низкого давления 271-70К, D = 1,1 мм	13,4	12,5
6.	Первый повив брони	1) Стальная оцинкованная проволока 28×1,55 мм; 2) Стальная оцинкованная проволока 14×1,55 мм	16,5	15,5
7.	Второй повив брони	1) Стальная оцинкованная проволока 30×1,75 мм; 2) Стальная оцинкованная проволока 17×1,75 мм	20,0	18,6
8.	Защитная оболочка	Полиэтилен низкого давления 273-81К, D = 0,7 мм	–	20,0



а *б*

Рис. 1.76: *а* — КГП 1-190 (вариант 1); *б* — КГП 1-190 ПЛ-20,0 Оа (вариант 2)

Основные параметры глубоководных коаксиальных кабелей КГП 1-190 [446]:

Электрические:

Электрическое сопротивление токопроводящей жилы, не более 4,89 Ом/км;
Сопротивление изоляции ТПЖ, не менее 20000 МОм/км;
Электрическое сопротивление экрана, не более 3,2 Ом/км;
Сопротивление изоляции экрана, не менее 20000 МОм/км;
Волновое сопротивление на частоте 5 МГц 50 ±5 Ом;
Коэффициент затухания на частоте 1 МГц 4 ±1 дБ/км;
Коэффициент затухания на частоте 5 МГц 10 ±2 дБ/км.

Механические: *Вариант 1, Вариант 2:*

Масса кабеля на воздухе, не более 1300...850 кг/м;
Масса кабеля в воде, не более 536...195 кг/м;
Разрывное усилие, не менее 190...100 кН.

ООО «Псковгеокабель» выпускает достаточно большую номенклатуру кабелей для буксировки за судном или кораблём различных носителей, антенн и другой аппаратуры. На рис. 1.77 представлены наиболее интересные кабели этой группы [447].

В табл. 1.17 приведены характеристики глубоководных коаксиальных кабелей КГП 1-190.

Таблица 1.17. Характеристики глубоководных коаксиальных кабелей КГП 1-190

№ п/п	Наименование элементов конструкции	Материал элемента конструкции, размеры	Диаметр, мм
1.	Токопроводящие жилы возбуждения	Медь, мм, 19×0,38 (2,1 мм^2)	1,85
2.	Изоляция ТПЖ возбуждения	Сополимер пропилена 02015-302КМ-004 белый, D = 0,9 мм. Цвета: 1 шт. — естественный в центре. По периферии: 1 шт. — естественный; 1 шт. — красный; 1 шт. — синий; 1 шт. — зеленый	3,5
3.	Оптоволоконный модуль	Стандартное одномодовое волокно в сополимерной оболочке	0,85
4.	Оболочка оптоволоконного модуля — ТПЖ электропитания	Медная трубка 1,0/1,62	1,62
5.	Изоляция модуля (ТПЖ)	Сополимер пропилена 02015-302КМ-004 белый, D = 0,82 мм	3,3
6.	Экран	Фольга алюминиевая 0,02×25	3,5
7.	Сердечник кабеля с продольной герметизацией	Полиизобутилен П10, П15 на центральную жилу	10,5
8.	Промежуточная оболочка	ПНД 271-81К, D = 1,75 мм	14,5
9.	Первый повив грузонесущего элемента	Проволока стальная оцинкованная, 30×1,50 мм	17,3
10.	Второй повив грузонесущего элемента	Проволока стальная оцинкованная, 36×1,50 мм	20,3

Ниже, справочно, приводятся только поперечные разрезы кабелей, применяемых для построения буксируемых кабельных систем. Типовые размеры кабелей охватывают диапазон диаметров до 32 мм для кабеля КГ-32, относимого к тяжелым кабель-буксирам, до легких кабелей диаметром от 3 мм (КГ 2×(0,7 + 100 В) + + 2×0,35-55-60). Рабочие нагрузки при этом составляют соответственно от 150 до 25 кН.

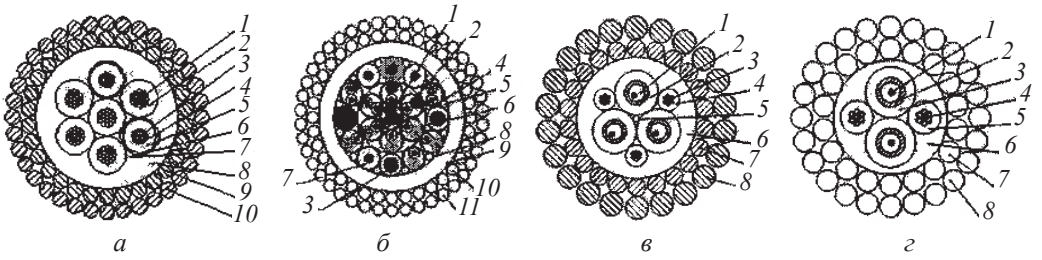


Рис. 1.77. Кабели для буксировки:
а — ЭГН; *б* — КГ-32; *в* — КГ (3×0,2+100 В)–60–60; *г* — КГ 2×(0,7+100 В)+2×0,35–55–60

Основные параметры:
Электрические:

Электрическое сопротивление ТПЖ возбуждения, не более	10 Ом/км;
Эл. сопротивление проводника медной оболочки модуля, не более	25 Ом/км;
Сопротивление изоляции, не менее	10000 МОм/км.

Оптические:

Затухание сигнала на длине волны 1,55 мкм, не более	0,7 дБ/км.

Механические:

Разрывное усилие	200 ±10кН;
Предельно допустимая рабочая нагрузка	150 кН;
Масса кабеля, не более	1250 кг/км.

Кабели имеют в своем составе набор силовых и сигнальных проводников, а также оптоволоконные каналы передачи информации.

При работе с водолазными колоколами могут использоваться грузонесущие тросы, кабель-тросы и шланг-кабели, причем шланг-кабели обычно работают в паре с грузонесущим тросом (рис. 1.78) [124, с. 144].

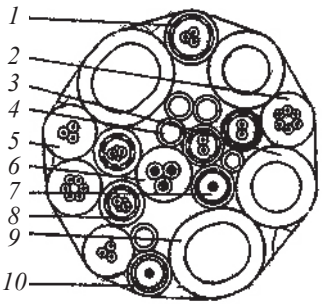


Рис. 1.78. Схема сечения шланга-кабеля водолазных колоколов фирмы КОМЕКС [124, с. 144]:
1 — кабель датчика температуры; *2* — кабель подачи электропитания на светильники и побудитель расхода блока поглощения углекислого газа; *3* — шланг подачи дыхательной смеси для водолазов; *4* — шланги пневмосистем и забора проб дыхательной смеси из колокола; *5* — кабель силового питания для шести забортных светильников; *6* — кабель силового питания энергоблока; *7* — кабель переносной телевизионной камеры; *8* — кабели систем связи; *9* — шланг подачи горячей воды для обогрева водолазов; *10* — кабель телевизионной камеры

Грузонесущие тросы используются в паре со шланг-кабелем (рис. 1.78), причем сам колокол висит на несущем тросе, а шланг-кабель вытравливают с отдельной лебедки и на быстросъемных захватах вручную или автоматически крепят к несущему тросу.

Примером кабель-троса может служить использованный в водолазном комплексе ДДС-МК1 трос фирмы «Симплекс корпорейшен» (США). Он представляет собой группу электрических проводников, заключенных в наружную двойную грузонесущую броню. Диаметр кабеля 50,8 мм, разрывное усилие 0,627 МН (64 тс), длина 427 м. Внутри кабель-троса размещены девять токонесущих силовых жил, три коаксиальных кабеля, по двенадцать экранированных одножильных и двухжильных фидеров.

Несущие тросы, как правило, представляют собой обычные стальные нескручивающиеся тросы повышенной гибкости диаметром около 25 мм.

Так, в подводной системе спасения SRS–RCS (Submarine Rescue System – Rescue Capable System), основным элементом которой является привязной спасательный глубоководный аппарат (ПСГА) «Фалкон» (Pressurized Rescue Module — PRM) с устройством стыковки и камерой присоса, созданный компанией «Оушен уоркс интернэшнл» [275], кроме набора шаблонов палубных фундаментов, спускоподъемного устройства (СПУ), палубного ложемента, контейнеров-модулей управления, дизельгенераторов и т.п., входит также лебедка кабель-троса (рис. 1.79).

Барабан главной лебедки (Umbilical Winch) рассчитан на 914 м кабель-троса, включая амортизационную вставку, которая расположена непосредственно у реборды (на рисунке видны наборные фрагменты оранжевого цвета). Во время работы лебедки эта вставка занимает определенное положение на кабель-тросе при достижении устройством доворота и подхвата (ПСГА) глубины около 46 м. Лебедка оборудована собственной системой гидропривода, которая размещается поверх контейнера блока дизель-генераторов. Предусмотрены два основных режима ее работы: низкого натяжения кабель-троса (908 кг на нижнем слое), когда ПСГА закреплен в устройстве доворота и подхвата в момент спуска и подъема, а также

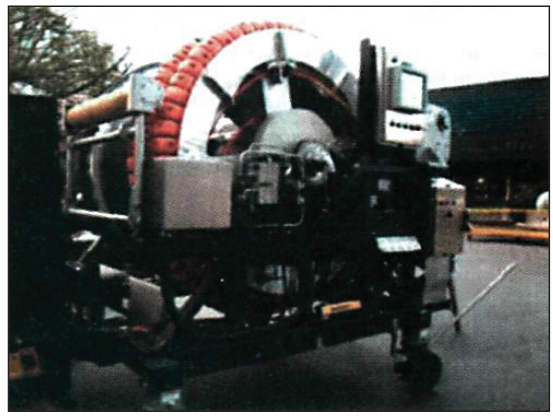


Рис. 1.79. Лебедка кабель-троса

высокого натяжения (около 4 т на нижнем слое), когда аппарат находится в подводном положении, не имея связи с этим устройством. Номинальное тяговое усилие лебедки составляет около 1,8 тс, спецификационная скорость — 0,384 м/с.

Схема конструкции кабель-троса приведена на рис. 1.80 [275].

На рис. 1.81 представлены комбинированные кабель-шланги для добычи углеводородов (печатается с разрешения профессора, д.т.н. Блинцова В.С.).

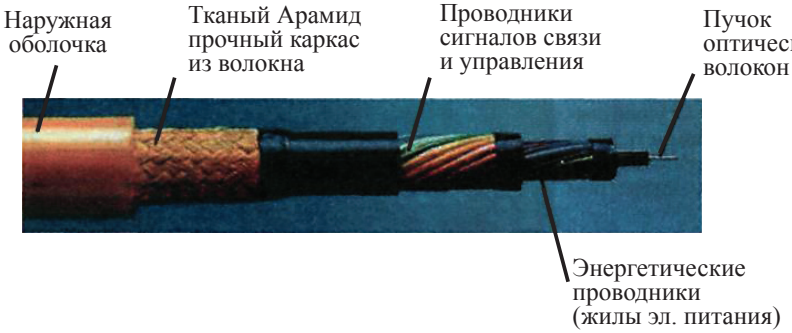


Рис. 1.80. Схема конструкции кабель-троса

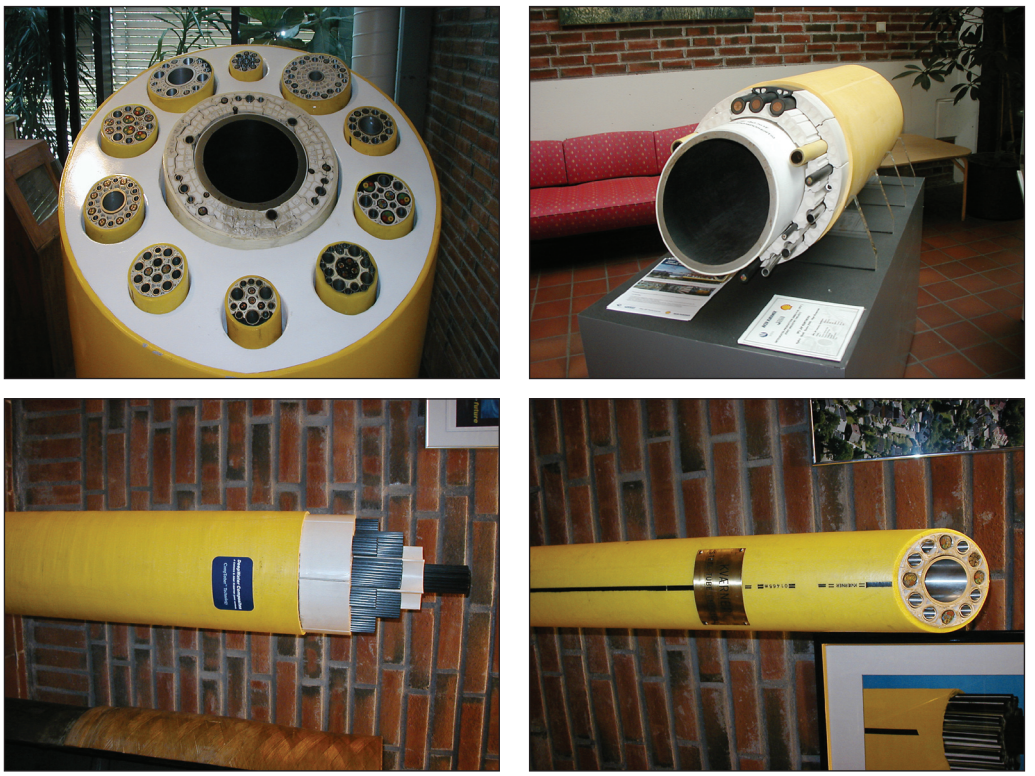


Рис. 1.81. Комбинированные кабель-шланги для добычи углеводородов

1.4. Применение гибких связей в морском деле

В качестве ГС в морском деле используют тросы, канаты, лини и т.п., которые ранее изготавливали из различных растительных волокон, из стали, а в настоящее время также и из синтетических и других искусственных материалов. Кроме всего прочего, существуют и так называемые комбинированные тросы (пенька-сталь, кабель-тросы и пр.), имеющие довольно сложную конструкцию.

Необходимо отметить, что имеется довольно обширная литература по использованию ГС в народном хозяйстве, что и не удивительно, в частности: в морском деле, как неотъемлемая часть судовых и судовых специальных устройств (там же), привязных подводных систем [11, 14, 159], подводных буксируемых систем [122, 127, 136, 137, 176, 145, 150, 272], МПС [11, 31, 386], в подводной технике морских нефтепромыслов и горном промысле [33, 56, 192, 294], технических средствах исследования океана [41, 64, 69, 86, 100, 102, 105–108, 137, 145, 138, 200, 257, 282], подводных инженерных исследованиях [63, 98, 105, 106, 159, 160, 298, 312], сооружениях морского шельфа [31, 190, 252], хозяйственном освоении ресурсов океана [25, 90, 91, 128, 135, 145], разведке и разработке нефтяных и газовых месторождений [51, 87, 290], рыбном промысле и промысловых устройствах морских и речных рыболовных судов [32, 73, 92, 96, 96, 139, 189, 285, 313], на спортивных судах и яхтах [135, 273–274], в авиационных средствах спасения [6], авиационных буксируемых системах — аэросцепках [34, 117], в космических исследованиях [144], различных подвесных, т.н. висячих, системах [39, 119].

1.4.1. Появление гибких связей на флоте

Как известно, на флоте слово «веревка» не употребляют, вместо него говорят «трос» или «конец». Трос (гол. tros) — общее наименование канатно-верёвочных изделий из естественных (растительных) и искусственных волокнистых материалов, а также из стальной проволоки [194]. На парусных судах для крепления рангоута и управления им и парусами, а также проведения грузовых операций использовали совокупность тросов (снастей), которую называли такелажем [237, с. 270], [60, 172, 183]. Различают стоячий такелаж (неподвижные снасти для поддержания и крепления рангоута) и бегучий такелаж (подвижные снасти для работы с парусами и т. д.). Тросы использовали также для швартовных и буксирных операций [12, 35, 53, 89, 172, 183, 195, 199]. Под снастями понимали все имеющиеся на судне тросы тросовой и кабельной работы, а также лини [199]. Поскольку речь идет о снастях из растительных волокон, то их изготовляли из пеньки (конопли), манилы (бананового дерева), кокоса (ореха), позже стали изготавливать и из стали. Проволочные тросы, которые мало-помалу в общем судостроении сменили растительные, свивались из стальных проволок и часто имели пеньковый сердечник.

Для шитья парусов использовали специальные парусные нитки. Для окантовки парусов также использовались различные тросы (так называемый лик-трос) [237, с. 270].

В XVIII в. единственным материалом для тросов была пенька из волокон конопли [60, с. 261]. Лучшей пенькой, используемой в Англии, считалась пенька, которую делали из конопли, выращенной на юге России. Рижская чистая пенька относилась к высшему сорту, а очищенная петербургская — ко второму. Названия сортов, как видно, происходили от наименований портов, откуда прибывал этот товар. Сначала пеньку прочесывали и опрыскивали небольшим количеством масла (пол-литра на центнер пеньки), чтобы сделать ее для прядения более скользкой. Затем из пеньки пряли нити — каболки. Пряли их слева направо и, взяв в зависимости от толщины троса необходимое количество каболок, вили их справа налево и получали пряди. Три пряди, спущенные (свитые) слева направо, образовывали трос. Такой трехпрядный трос прямого спуска был наиболее распространенным.

Если для изготовления троса использовали четыре пряди, то пряди спускали вокруг пучка слабо свитых каболок — сердечника.

На судах Киевской Руси канаты назывались *ужи* или *при* [78, с. 102]. К строительству судов было привлечено значительное количество квалифицированных специалистов. Ремесленники-мужчины изготовляли корпус и его оснащение, а женщины ткали специальную ткань для парусов [79, с. 104]. Судостроение нуждалось в создании налаженного производства грубого парусного полотна, которое бы отвечало определенным стандартам как по размерам, так и по качеству. Так, по подсчетам Б. Рыбакова, на оборудование паруса лишь одного корабля шло 16 м «толстины» (грубой ткани). Общие расчеты, осуществленные этим исследователем, показали, что для флотилии из 400–500 судов требовалось 2 тысячи ткацких станков на протяжении всей зимы или работа женщин из 80–100 сел того времени. Кроме этого необходимо было вырастить лен и коноплю в таком количестве, чтобы можно было изготовить приблизительно 20 тысяч «ужищь» — корабельных канатов [78, с. 104]. Женский труд широко использовался в судостроении Древнерусского государства. На него работало еще и большое количество княжеских ремесленников в городах и крестьян-общинников в селах. Привлечение к постройке судов ремесленников разных профессий было возможным лишь при условиях применения государственных принципов координации их деятельности. Общий контроль за сооружением судов осуществляли специально предназначенные пять государственных чиновников (как пишет Б. Рыбаков, «областных начальников»), в том числе сын Большого князя [79, с. 105]. Утверждения специалистов-историков Киевского Движения, что судостроение как одна из важнейших областей средневекового ремесла находилось под непосредственным контролем великокняжеской власти. Не вызывает сомнения и то, что история развития судостроения Древнерусского государства была неразрывно связана с общим мировым технологическим прогрессом. С развитием внешнеполитических, экономических связей судостроение заимствовало зарубежный опыт, перенимая иностранные конструкции судов и их названия.

Согласно Регламенту в 30-х гг. XVIII ст. в России определялись виды специализации мастеров: по обработке дерева (столярному производству), металла, изготовлению канатов, парусов, конопатных работ и др. Подготовка рабочих происходила

как путем ученичества у более опытных, так и за счет обучения на заграничных верфях начинающих судостроителей [78, с. 140]. В 1726 г. вводится в практическое обращение «Штат корабельного и галерного такелажа», который содержал сведения относительно рангоута и парусного вооружения. Т.е. сделана попытка создания нормативно-законодательных основ судостроения в Русской империи.

Трехпрядный трос прямого спуска или тросовой работы (нем. Trossenschlag) отличали от аналогичного четырехпрядного «Байтового спуска», хотя трос, изготовленный подобным образом, не обязательно имел какое-то отношение к вантам. Три троса, спущенные справа налево, образовывали трос кабельной работы. Ванты нижних мачт большей частью были кабельной работы и большинство штагов четырехпрядными тросами кабельной работы. Таким образом, трос кабельной работы мог иметь от 9 до 12 прядей (рис. 1.82–1.84) [60, с. 261].

Линь. Если окружность троса была меньше 1 дюйма, то его называли линем. Среди них различали флаг-лини, «выбленочный» линь (в 6,9 или 12 нитей каболки в лине называли нитями), слаблинь, марлинь, двух-или трехнитевой бензельный линь, шкимушгар, юзинь, такелажные и парусные нитки. Лини по изготовлению были одинаковы с более толстыми концами. Отличие заключалось лишь в числе волокон пеньки на нить (каболку) и количестве нитей на прядь. Бензельный линь был двух- или трехнитевой.

В судоходстве ранее использовали тированные (смоленные) или нетированные (несмоленные, иначе белые) тросы. Нетированный трос, как правило, используется в бегучем такелаже, а тированный, главным образом, там, где он часто подвергается воздействию воды. Тир предохранял трос от преждевременного загнивания; по единодушным высказываниям различных авторов того времени, наилучшим для этой цели являлся стокгольмский тир.

В конце XVIII в. англичанин Чапман высказал мнение, что определенные вещества в тире вызывают в снастях сухую гниль и рекомендовал для пропитывания снастей применять каменноугольное масло (что он и запатентовал) [60, с. 262]. В 1741,

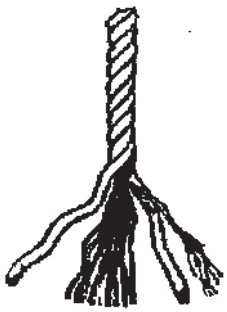


Рис. 1.82. Трос из волокон пеньки (конопли) с каболками и 3-мя прядями



Рис. 1.83. Четырехпрядный трос

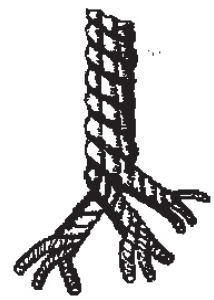


Рис. 1.84. Трос кабельной работы*

* В оригинале кабельтов (нем. Kabel). В России так называли лишь тросы толщиной (по окружности) от 6 до 13”, от 4 до 6” — перлинями, а более 13” — канатами. ” — обозначение дюйма.

1743 и 1746 гг. Дюмель де Монсо провел в Рошфоре эксперименты с тированными и нетированными концами: обработанные соответствующим образом тросы из лучшей рижской пеньки окружностью до 3” подвергались испытаниям на разрыв. Оказалось, что нетированные тросы на 25–30 % прочнее тированных. Добавочный эксперимент выявил, что нетированный трос после трех лет хранения на складе находился в том же хорошем состоянии и с той же прочностью на разрыв, как и в день укладки на хранение. У тированных же тросов прочность уменьшалась на 20 %.

Сведения о лучшем качестве нетированных снастей задолго до этих опытов уже были известны некоторым такелажным мастерам. Так, Фалконер в статье своего словаря писал, что в 1758 г. на судостроительную верфь Портсмута были отправлены ванты и штаги одного прама [60, с. 262]. Когда с них сняли тренцовку и клетневку, то обнаружили нетированные снасти. При просмотре книг управляющих складом выяснилось, что еще в 1716 г. эти ванты и штаги предназначались для такелажа «Ройал Уильям» — корабля с 110 пушками. Однако такелаж посчитали слишком обременительным, поэтому его сняли и положили на склад. Через два года им вооружили прам и в течение почти 40 лет эти штаги и ванты выполняли свою тяжелейшую работу, в то время как тированный такелаж на праме неоднократно заменялся. Этот маленький эпизод показывает, что ванты и прочий стоячий такелаж тировали не всегда, иногда его лишь мазали тиром по клетневке.

Парусные и такелажные нитки отличались только количеством волокон в нитках.

Шкимушгар — двухпрядный трос, который использовали для клетневки и бензелевки. Он был ворсистым и большей частью толще, чем юзинь.

Юзинь имел диаметр 2–5 мм (1/4–5/8” по окружности), был гладким, свит из трех прядей и тирован. Использовался для клетневки, в качестве бензеля и найтова.

Тросы по принципу изготовления разделяются на тросы прямого и обратного спуска или соответственно тросовой и кабельной работы. Если свивку волокон делают справа налево, каболок — слева направо, прядей — опять справа налево, а стрендей — слева направо, то такой трос называют тросом прямого спуска. Если свивку волокон, каболок, прядей и стрендей ведут в обратной последовательности, то получают трос обратного спуска. Такой порядок свивки обеспечивает тросу круглую форму и не дает раскручиваться (рис. 1.85) [194, с. 348].

В судостроении также применяют ткани и оболочки на их основе: обычные, так называемые непокрытые материи, прорезиненные ткани, а также многослойные резинотканевые композиции. В старину это были, главным образом, паруса и брезенты; в наши дни — надувные спасательные плоты, средства посадки на них людей, кранцы, мягкие пневмопокрывала для удержания от смещений зерновых грузов, мягкие переборки, емкости, тенты [172, с. 62-63]. В судовых устройствах встречаются и другие гибкие элементы — эластичные: резиновые привальные брусья, кранцы, амортизаторы.

В настоящее время на кораблях военно-морского флота пеньковые тросы практически не используются. Это можно объяснить тем, что они заменяются канатами и тросами из искусственных волокон. Кроме того, промышленность практи-

чески не изготавливает такие канаты. До конца XX в. на судах торгового флота пеньковые тросы использовали лишь как диплотлини, бросательные концы, шкимушгары [199, с. 7]. Всего несколько десятков лет тому назад штормтрапы были только пеньковыми. В настоящее время их оснащают манильскими тросами или цельнометаллическими. Найтовы, шкимушгары, марлини и парусные нитки выпускались преимущественно пеньковыми, а парусину и брезент ткали также из льна.

На парусном флоте в зависимости от толщины (толщина растительного троса измеряется по окружности) различали следующие растительные тросы кабельной работы: канаты — с окружностью свыше 13 дюймов (более 330 мм), кабельтовы — от 6 до 13 дюймов (152–330 мм) и перлини — от 4 до 6 дюймов (100–152 мм) [127, с. 270]. Они предназначены для швартовки и буксировки судов [60, 183, 237].

Тросы тросовой работы от 1 до 4 дюймов особых названий не имеют, их называют «трос такой-то толщины» и применяют в качестве стоячего и бегучего такелажа [183, с. 270]. Тросы толщиной 1 дм и менее называют линями, число каболок в них может доходить до 12. Лини бывают в основном тросовой работы, их применяют для подъема флагов, клетневания (шкимушгар), изготовления выбленок, бензелей (марлинь, юзинь) и т. д. Тросы старинных судов имели такие же названия.

Трос кабельной работы толщиной (длиной по окружности) от 100 до 150 мм называются перлинями, от 150 до 330 мм — кабельтовыми и св. 350 мм — канатами. Трос кабельной работы слабее троса тросовой работы на 25–30%, но может вытягиваться при работе и более эластичен, поэтому его используют в качестве буксирного троса и швартовов [135]. Тросы 3-прядные прочнее 4-прядных (при тех же размерах) на 20–25%. Сухой трос прочнее мокрого на 30%.

Тросами из хлопка оснащают в основном небольшие яхты. Такие тросы очень мягкие и гибкие. Их легко травить, они хорошо работают в блоках. Но поскольку хлопковые тросы сильно растягиваются, они непригодны как фалы, а используются лишь как шкоты и швартовные концы, для которых растяжение не имеет принципиального значения. Из хлопка производили также тонкие веревки и нити для изготовления рыболовных сетей и лес [199, с. 10].

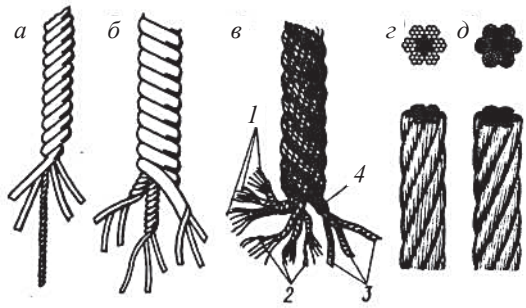


Рис. 1.85. Виды тросов:

а — пеньковый тросовой работы; *б* — пеньковый кабельной работы; *в* — металлический кабельной работы; *г* — проволочный жесткий; *д* — проволочный мягкий; *1* — волокна; *2* — каболки; *3* — пряди; *4* — стренди [194, с. 348]

В США даже парусный брезент ранее ткали из хлопка. Сравнительно недорогой, он практически полностью вытеснил пеньковый брезент. До конца XX в. из хлопкового брезента шили паруса для парусников и мотоботов, полотнища, укрепляемые на релингах, тенты и т.п.

1.4.2. Применение гибких связей на флоте

Шнуры [189] состоят обычно из оплетки (оболочки), изготовленной путем взаимного переплетения нескольких прядей, и сердечника внутри оплетки в виде жгута ниток или текстильных нитей. Тонкие шнуры могут не иметь сердечника. В соответствии со стандартом капроновые шнуры производят диаметром от 3,1 до 16 мм.

Веревки относятся к крученым изделиям [189]. В рыболовстве применяют трёх- и редко четырехпрядные капроновые веревки из комплексных нитей с линейной плотность от 93,5 и 187 текс. Они имеют диаметр от 3,1 до 7 мм. Веревки широко используются для вывязки сетного полотна, в качестве пожилин, для посадки делей на остропочные элементы, для крепления плава, груза и прочих деталей оснастки орудий лова. Верёвка получается скручиванием между собой 3 или 4 прядей, которые также скручены из неск. нитей пряжи (каболок), выработанной из волокон растительного и иногда животного происхождения. В. изготовляются от 10 до 60 мм в окружности [209, с. 289].

Пеньковые канаты ранее широко применялись в речном и морском транспорте, судовых устройствах (табл. 1.18) [172], рыбной, лесной, горной, строительной и других отраслях промышленности.

Таблица 1.18. Области применения растительных канатов в судовых устройствах [172]

Тип каната	Длина окружности, мм	Область применения
Манильские, сизальские	60–250	Швартовы
	90–250	Буксиры
	25–30	Бросательные концы
	50–90	Лопари талей оттяжек и контроттяжек грузовых стрел
	50–90	Топенанты грузовых стрел
	50–90	Шлюптали
	50–90	Шлюпочные гордени
	25–70	Шлюпочные снасти
Пеньковые	30	Бросательные концы
	50–90	Шлюпочные гордени
	25–70	Шлюпочные снасти

При буксировке судов пеньковые канаты имели большее преимущество перед стальными благодаря своей гибкости, эластичности; они незаменимы при крутых изгибах. Канаты пенька-сталь использовались также при траловом лове и для буксирных целей. Основные характеристики растительных тросов отечественного производства приведены в табл. 1.19 [197, с. 148].

Пеньковые канаты допускается применять в качестве швартовных тросов только на судах, N_c которых, вычисленная по формуле (I.3), не превышает 600 [8, 186]. На судах с $N_c \geq 600$ следует использовать более прочные, чем пеньковые, легкие и гибкие манильские и сизальские канаты. Растительные швартовные тросы обязательно применяются на судах, перевозящих легковоспламеняющиеся нефтепродукты, и на судах тропического плавания.

Стальные тросы, используемые на судах, изготовляют из проволоки, свитой по спирали. Обычно тросы состоят из шести прядей, свитых вокруг пенькового манильского или джутового сердечника [199, с. 26]. Сердечник заполняет пустоту в центре троса, образованную между прядями, предохраняет пряди от проваливания к центру и защищает внутренние слои проволок троса от коррозии, так как пропитан антикоррозионной смазкой, которая выделяется между проволоками прядей при изгибе троса. Стальные тросы изготовляют из стальной проволоки разного качества. Ее сорта указаны в перечнях продукции изготовителей. Жесткие тросы, пряди которых состоят только из стальной проволоки, используют для стоячего такелажа, их называют стальными такелажными тросами.

На небольших судах широкое применение получили гибкие тросы, которые используются как швартовные. Они свивались из тончайших проволочных прядей, соединенных с прядями из лучшей пеньки. В начале XX в. Фагерста изобрел другой вид троса, так называемый тайфун-трос, в каждой пряди которого стальной сердечник оплетался пеньковой нитью [199, с. 27]. Такие тросы были гибкими, но не очень прочными, потому что внешняя пеньковая нить легко рвалась и цеплялась за выступающие части лебедки, что постепенно выводило трос из строя. В 70-е годы XX в. выпускали тросы, подобные описанным выше, так называемые комбинированные (геркулес — ещё одно название для комбинированного троса), со стальным сердечником и внешними нитями из манилы или сизаля, которые использовали на рыболовных траулерах в качестве траловых тросов (ваеров) и футрепов.

Швартовные стальные тросы обычно свиты из 72 проволок, по 12 в каждой пряди вокруг пенькового сердечника. Это гибкие тросы. Тросы, свитые из 144 тонких проволок (по 24 в каждой пряди) вокруг пенькового сердечника, называют тросами повышенной гибкости. Раньше их использовали для обшивки шкаторин на больших парусных судах, а в настоящее время как грубый бегучий такелаж на топенантах грузовых стрел.

Бензельные тросы изготовляют из мягкой железной проволоки. На рис. 1.86 [199, с. 28] слева направо показаны: такелажный трос из 42 проволок, трос лебедки крана из 114 проволок, гибкий швартовный трос из 72 проволок, трос повышенной гибкости для бегучего такелажа из 144 проволок, а также бензельный трос из 7 и 12 проволок.

Толщина стальных тросов, используемых на судах, определяется по длине окружности троса в английских дюймах или по диаметру в миллиметрах, тонких тросов, используемых на яхтах и в промышленности — по диаметру в миллиметрах.

Таблица 1.19. Характеристики растительных канатов

Размеры каната, мм		Пеньковые смольные				Манильские				Сизальские			
		специальные		повышенные		повышенные		нормальные		повышенные		нормальные	
окружность	диаметр	Вес 100 пог. м, кг	Разрывное усилие, кг	Вес 100 пог. м, кг	Разрывное усилие, кг	Вес 100 пог. м, кг	Разрывное усилие, кг	Вес 100 пог. м, кг	Разрывное усилие, кг	Вес 100 пог. м, кг	Разрывное усилие, кг	Вес 100 пог. м, кг	Разрывное усилие, кг
50	15,9	22,4	1 653	20,3	1 376	18,5	2 125	17,5	1550	17,2	1550	17,0	1 110
60	19,1	31,9	2 250	29,8	1 916	26,7	2 970	25,5	2 230	25,3	2 230	24,5	1 630
65	20,7	37,2	2 594	35,4	2 202	30,5	3 330	29,7	2 520	29,0	2 390	28,1	1 760
75	23,9	50,1	3 372	47,4	2 936	41,6	4 480	40,5	3 425	39,5	3 425	33,3	2 720
90	28,7	72,0	4 588	70,0	4 037	59,9	6 380	58,4	4 800	56,0	4 640	54,5	3 670
100	31,8	89,7	5 559	86,0	4 916	74,0	7 450	72,0	5 670	70,0	5 510	68,0	4 050
115	36,6	118,0	6 976	112,0	6 133	98,0	9 770	95,3	7 670	92,0	7 480	90,0	5 220
125	39,8	139,2	8 255	132,0	7 159	115,8	11 120	112,5	8 600	108,5	8 400	106,0	5 960
150	47,8	198,2	11 667	190,0	10 100	166,5	16 000	162,0	12 300	154,5	11 950	150,0	8 190
175	55,7	273,8	15 190	260,0	13 162	227,0	20 550	228,0	15 720	213,5	15 400	208,5	10 900
200	63,7	356,4	19 155	343,4	16 733	296,0	26 400	292,0	20 350	278,0	19 990	272,0	14 100
225	71,7	451,9	23 686	429,5	20 482	376,0	32 300	364,4	24 950	352,0	24 150	344,0	17 200
250	79,6	554,6	27 791	532,0	24 199	463,0	38 600	450,0	29 650	435,0	28 750	425,0	20 620
275	87,6	672,6	32 989	643,0	28 822	560,0	45 100	544,0	34 850	526,0	33 800	514,0	24 200
300	95,5	799,0	38 000	776,0	33 097	667,0	52 600	647,0	40 500	625,5	39 300	612,0	28 180
325	103,5	938,0	42 280	900,0	36 894	780,0	57 700	760,0	44 500	735,0	43 200	716,0	30 750
350	111,5	1088,0	47 262	1043,0	41 133	910,0	63 700	884,0	49 200	852,0	47 600	834,0	34 100

Прочность тросов в большой степени зависит от качества стали и типа свивки [199, с. 29]. Например, стальной цельнометаллический трос, пряди которого состоят только из стальных проволок, намного прочнее троса с пеньковым сердечником. В таблице 1.20 приведены данные о разрывной прочности тросов в зависимости от качества стали для тросов толщиной 76,2 мм (данные крупнейшей английской фабрики по производству тросов, г. Кардифф-Буливан).

Таблица 1.20. Данные о разрывной прочности тросов [199]

№	Тип стали	Разрывное усилие, т
1.	Сельскохозяйственная высшего качества	34
2.	Мягкая сельскохозяйственная	30
3.	Лучшая патентованная	25
4.	Бессемеровская	13

Стальные тросы для судового такелажа начали выпускать в Великобритании более 180 лет назад. Фирма по производству тросов Ньюол в г. Ньюкасл-эн-Тайн запатентовала усовершенствованный стальной трос [135, с. 30]. В 50-х гг. XIX в. большинство новых судов флота Англии оснащалось стальным такелажем, который стал отличительной особенностью английских судов.

В Швеции стальной такелаж начали применять позднее. Первым судном с полным стальным такелажем был «Франс Шартан», построенный в 1864 г. в Евле, Швеция [199, с. 30]. В 70-х гг. XIX в. на шведских одномачтовых судах ванты были пеньковыми, а штаги — стальными. На шведских пароходах в это же время стоячий такелаж изготовляли только из стального троса. Для бегучего такелажа стальные тросы было сложнее приспособить. И только через 60 лет на многих шведских судах появились цепные топенанты грузовых стрел. За рубежом материал, из которого изготовляли тросы — это нержавеющая, легированная, хромоникельмолибденовая сталь, стандарт SIS 2343. Для уменьшения напряженности троса проволоку обычно полируют и придают ей нужную форму. Данные о надежности и прочности различных тросов даются в таблицах, прилагаемых изготовителями тросов.

На судах морского флота применяются стальные тросы, изготовленные из оцинкованной проволоки толщиной от 0,4 до 3,0 мм, с пределом прочности от 120 до 180–200 кгс/мм^2 [12, с. 18]. Проволока, идущая на изготовление тросов, вырабатывается трех марок: В, I, II. Наиболее высокими качествами (в частности

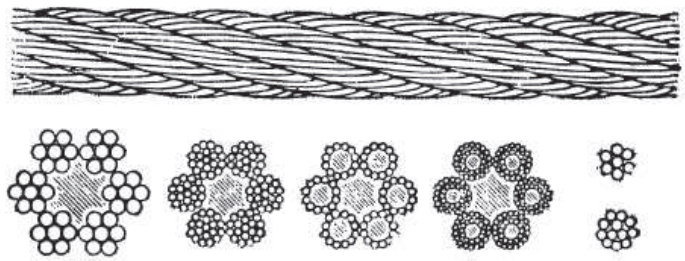


Рис. 1.86. Типы стальных тросов

вязкостью) обладает проволока марки В, затем идет проволока марки I и, наконец, марки II.

Наибольшее распространение на судах морского флота имеют тросы двойной свивки и особенно шестипрядные, свитые вокруг органического (пенькового) сердечника. Пряди троса образуются путем свивки проволок вокруг одной центральной либо вокруг органического сердечника в один или в несколько рядов. Конструкция пряди троса указывается в характеристике троса записью в виде суммы цифр. Первая цифра указывает на характер сердечника, вторая — на количество проволок в первом от центра пряди слое, третья — во втором и т. д. Сумма всех цифр укажет общее количество проволок в пряди. Например, запись 1+6 означает, что в пряди всего 7 проволок, из них 6 свито в один ряд вокруг седьмой, центральной. Если прядь многорядная, то запись будет иметь вид: 1+6+12. В этом случае прядь имеет всего 19 проволок; из них в первом ряду 6, во втором 12, а одна проволока центральная. У прядей с органическим сердечником вместо единицы ставится нуль. Запись 0+9+15 означает, что прядь имеет 24 проволоки, свитых в два ряда — 9 и 15, проволоки свиты вокруг органического сердечника [183, с. 19]. Если проволоки последующего ряда свивают в ту же сторону, что и предыдущего, то оба слоя будут соприкасаться между собой по всей длине проволоки. Трос, свитый из таких прядей, называется тросом с линейным касанием проволок и обозначается буквами ЛК. При навивке каждого последующего слоя проволок в сторону, противоположную предыдущему, получается трос с точечным касанием — ТК. Пряди между собой могут свиваться в одну сторону со свивкой проволок в пряди и в разные стороны. В первом случае получается трос односторонней свивки, а во втором — крестовой. Наконец, трос может быть свит из прядей, половина которых имеет левую свивку, а вторая половина — правую. Такой трос называется тросом комбинированной свивки.

Регистр СССР рекомендовал для различных целей употреблять на судах морского флота стальные тросы следующих конструкций [186, с. 19]. Для стоячего такелажа — трос конструкции 1×7 диаметром от 4,2 до 13,5 мм, ГОСТ 3062–55; конструкции 1×19, диаметром 9,0–22,5 мм (ГОСТ 3063–55); конструкции 7×7, диаметром 4,5–27,0 мм (ГОСТ 3066–55); конструкции 6×7 + 1 о. с. диаметром 11,5–28,0 мм (ГОСТ 3069–55).

Для бегучего такелажа — трос конструкции 6×12 + 7 о.с. диаметром 7,7–46,5 мм (ГОСТ 3082–55).

В качестве швартовов, буксирных тросов и тросов для якорей — конструкции 6×24 + 7 о. с. диаметром 9,3–56,0 мм (ГОСТ 3083–55), конструкции 6×30 + 7 о. с. диаметром 15,5–65,0 мм (ГОСТ 3084–55).

Для шкентелей, ручных лебедок и воротов — тросы конструкции 6×7+1 о. с. диаметром 3,8–10,5 мм (ГОСТ 3069–55), 6×7 + 1 о. с. диаметром 7,7–20,0 мм (ГОСТ 3070–55).

Для шкентелей механических лебедок — конструкции 6×24 + 7 о. с. диаметром 11,5–56,0 мм (ГОСТ 3083–55); конструкции 6×30 + 7 о. с. диаметром 15,5–65,0 мм (ГОСТ 3084–55).

До сих пор в крановых и палубных механизмах чаще всего применяют шестипрядные канаты с точечным касанием: ТК 6×19, ГОСТ 3070–66; ТК 6×24, ГОСТ 3083–66 и ТК 6×37, ГОСТ 3071–66 (первая цифра в обозначении каната означает число прядей, а вторая — число проволок в пряди); канаты с линейным касанием и проволоками разного диаметра (в обозначении каната буква Р) ЛК-Р 6×19, ГОСТ 2688–69; ЛК-Р 18×19, ГОСТ 3088–69 и ЛК-РО 6×36, ГОСТ 7668–69, а также канаты с проволоками заполнения (в обозначении — буква З) малого диаметра, расположенными в пространстве между проволоками большого диаметра ЛК-З 6×25, ГОСТ 7665–69. Поперечные сечения наиболее распространенных канатов показаны на рис. 1.87 [12, 186].

Основные характеристики наиболее распростренных канатов приведены в табл. 1.21 [186,201,202].

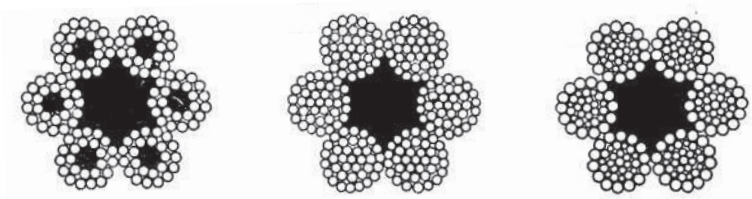
Области применения стальных канатов в судовых устройствах приведены в таблице 1.22 [172].

В грузоподъемных механизмах обычно используют перечисленные выше канаты ТК с 19, 24 и 36 проволоками в пряди. К неметаллическим канатам относятся растительные и синтетические. Растительные канаты обычно выполняют витыми трехпрядными, при этом пряди изготовляют скручиванием нитей пряжи (каболок), а синтетические выполняют плетеными уравновешенными, хотя они бывают и трехпрядные (например, капроновые).

В качестве стальных швартовных тросов, при отсутствии в устройстве автоматических швартовных лебедок, наиболее пригодны стальные канаты типа ТК, состоящие из 6×24 = 144 проволок и семи органических сердечников.

Для **ваеров** большое применение получили стальные канаты двойной свивки из трёхгранных прядей. Канаты имеют круглую форму и трёхгранные по сечению пряди. Наибольшее распространение в Мировом промышленном рыболовстве получили четырех- и шестипрядные канаты типа «синтетика-сталь», у которых каждая прядь образована пучком стальных проволок диаметром 0,5–1,2 мм, обвитых синтетическими прядями [189].

Рекомендуется применять канаты марки 1 с противокоррозионным покрытием ЖС, правой свивки. Рекомендуется принимать прочность проволок 140 и 150 кг/мм^2 (таблица 1.23) [198].



а *б* *в*

Рис. 1.87. Поперечные сечения наиболее распространенных канатов:
а — ТК 6×24, ГОСТ 3083–66; *б* — ТК 6×37, ГОСТ 3071–66; *в* — ЛК-РО 6×36, ГОСТ 7668–69

Таблица 1.21. Основные характеристики стальных канатов, применяемых в палубных механизмах

Тип ТК конструкции 6×24 по ГОСТ 3083–66					Тип ЛК-РО конструкции 6×36 по ГОСТ 7668–69				
Диаметр каната, мм	Расчетная масса 1000 м смазанного каната, кг	Расчетное разрывное усилие каната в целом, кН (тс), в зависимости от маркировочной группы по временному сопротивлению разрыву, МПа (кгс/мм^2)			Диаметр каната, мм	Расчетная масса 1000 м смазанного каната, кг	Расчетное разрывное усилие каната в целом, кН (тс), в зависимости от маркировочной группы по временному сопротивлению разрыву, МПа (кгс/мм^2)		
		1400 (140)	1600 (160)	1700 (170)			1400 (140)	1600 (160)	1700 (170)
7,4	185,5	–	24 (2,4)	26 (2,6)	9,7	383,5	–	50 (5,0)	54 (5,4)
8,4	234,0	–	31 (3,1)	33 (3,3)	11,5	513,0	–	68 (6,8)	72 (7,2)
9,3	288,5	–	38 (3,8)	40 (4,0)	13,5	696,5	–	92 (9,2)	98 (9,8)
11,5	416,0	–	55 (5,5)	58 (5,8)	15,0	865,0	–	114 (11,4)	122 (12,2)
13,5	566,0	65 (6,5)	75 (7,5)	80 (8,0)	16,5	1040,0	–	138 (13,8)	146 (14,6)
15,0	739,5	85 (8,5)	98 (9,8)	104 (10,4)	18,0	1245,0	–	165 (16,5)	175 (17,5)
17,0	935,0	108 (10,8)	124 (12,4)	132 (13,2)	20,0	1520,0	–	202 (20,2)	214 (21,4)
19,0	1155,0	134 (13,4)	153 (15,3)	163 (16,3)	22,0	1830,0	212 (21,2)	242 (24,2)	258 (25,8)
20,5	1400,0	162 (16,2)	185 (18,5)	197 (19,7)	23,5	2120,0	246 (24,6)	281 (28,1)	299 (29,9)
22,5	1665,0	193 (19,3)	221 (22,1)	235 (23,5)	25,5	2495,0	289 (28,9)	331 (33,1)	351 (35,1)
24,5	1955,0	227 (22,7)	259 (25,9)	275 (27,5)	27,0	2800,0	325 (32,5)	372 (37,2)	395 (39,5)
26,0	2265,0	263 (26,3)	301 (31,1)	320 (32,0)	29,0	3215,0	373 (37,3)	426 (42,6)	453 (45,3)
28,0	2590,0	301 (30,1)	344 (34,4)	365 (36,5)	31,0	3655,0	424 (42,4)	485 (48,5)	515 (51,5)
30,0	2955,0	344 (34,4)	393 (39,3)	418 (41,8)	33,0	4155,0	483 (48,3)	552 (55,2)	586 (58,6)
32,0	3340,0	388 (38,8)	444 (44,4)	472 (47,2)	–	–	–	–	–
33,5	3735,0	455 (45,5)	497 (49,7)	528 (52,8)	–	–	–	–	–
37,5	4620,0	538 (53,8)	614 (61,4)	653 (65,3)	–	–	–	–	–

Таблица 1.22. Области применения стальных канатов в судовых устройствах [125]

Тип и конструкция каната	Диаметр каната, мм	Область применения
ЛК-О 6×7(1+6)+1 о. с.	2,2–19,5	Стоячий такелаж, такелаж радиоантенны, штуртросы, лееры, канаты тентового устройства
ТК конструкции 6×19(1+6+12) + 1 о. с.	3,3–24	Стоячий такелаж
ТК конструкции 6×37(1+6 + 12+18) + 1 о. с.	5,0–66,5	Канаты грузовых устройств: шкентели, топенанты, гордени, канаты талей, канаты подъема забортных трапов
ЛК-РО конструкции 6×36(1+7 + 7/7+14) + 1 о. с.	5,0–66,5	Буксиры и швартовы при автоматических лебедках. Якорные канаты
ЛК-Р конструкции 6×19(1+6+6/6) + 1 о. с.	4,8–24	Шкентели грузовых лебедок
ЛК-О конструкции 6×19(1+9 + 9) + 1 о. с.	6,4–28	Канаты лифтов
ЛК-З конструкции 6×25(1+6; 6+12) + 1 о. с.	8,1–27,5	Канаты лифтов. Кабели и ваеры траловых устройств
ЛК конструкции 6×30 (0+15+15) + 7 о. с.	7,2–65	Швартовы и буксиры при использовании без автоматических лебедок; леерное ограждение. Стропы, ваеры, джильсоны, вытяжные и стяжные концы

Примечание: все канаты двойной свивки.

На эту прочность рассчитаны стандартизованные изделия швартовных устройств. При наличии автоматических швартовных лебедок целесообразно применять для швартовных тросов стальные канаты типа ТК, состоящие из 6×37 = 222 проволок и одного органического сердечника и типа ЛК-РО, содержащие 6×36 = 216 проволок и один органический сердечник. Желательно принимать пределы прочности проволоки 150 и 160 кг/мм^2 (для уменьшения размеров барабанов лебедок).

Ассортимент комбинированных канатов по диаметру составляет от 10 до 32 мм. Их используют во многих орудиях лова в качестве подбор, пожилин, урезов, каркасных элементов и т.д. Комбинированные канаты изготавливаются из круглой стальной проволоки с антикоррозионным покрытием и растительных или синтетических волокон. Наибольшее распространение имеют четырёх и шестипрядные канаты. В таких канатах нагрузку несут стальные проволоки, а волокна придают канату гибкость и предохраняют проволоки от износа. Отрицательным качеством является намокаемость в воде, поэтому после работы эти канаты требуют просушки.

В судовой практике жесткие тросы (сердечник только один между прядями) использовали для стоячего такелажа; гибкие тросы применяли в качестве швартовов, буксирных тросов, топенантов, шкентелей и бегучего такелажа; особо гибкие тросы — для подъемных механизмов, оттяжек, леерных устройств, стропов, найтовов и др. [172].

Таблица 1.23. Рекомендуемые типы стальных канатов для швартовных тросов

Диаметр каната, мм	ТК 6х24=144 проволоки			ТК 6х37=222 проволоки			ЛК-РО 6х36=216 проволок		
	Разрывное усилие при пределе прочности		Вес 100 пог. м, кг	Разрывное усилие при пределе прочности		Вес 100 пог. м, кг	Разрывное усилие при пределе прочности		Вес 100 пог. м, кг
	140 кг/мм^2	150 кг/мм^2		150 кг/мм^2	160 кг/мм^2		150 кг/мм^2	160 кг/мм^2	
8,4	2 720	2 910	22,5	–	–	–	–	–	–
9,3	3 350	3 590	27,7	–	–	–	–	–	–
11,5	4 840	5 190	40,0	–	–	–	–	–	–
13.5	6 590	7 060	54,5	–	–	–	–	–	–
15,0	8 580	9 220	71,1	–	–	–	–	–	–
15,5	–	–	–	10 450	11 150	80,3	–	–	–
17,0	10 850	11 600	90,0	–	–	–	–	–	–
17,5	–	–	–	13 700	14 600	104,8	–	–	–
18,0	–	–	–	–	–	–	15 450	16 450	117,4
19,0	13 400	14 400	111,0	–	–	–	–	–	–
19,5	–	–	–	17 300	18 450	132,6	18 900	20 150	143,6
20,5	16 250	17 400	134,3	–	–	–	–	–	–
21,5	–	–	–	–	–	–	22 700	24 200	172,6
22,0	–	–	–	21 500	22 950	164,6	–	–	–
22,5	19 300	20 700	159,8	–	–	–	–	–	–
23,5	–	–	–	–	–	–	26 400	28 200	200,8
24,0	–	–	–	26 000	27 750	199,1	–	–	–
24,5	22 700	24 350	187,7	–	–	–	–	–	–
25,0	–	–	–	–	–	–	30 950	33 000	234,9
26,0	26 350	28 250	217,8	31 100	33 150	237,7	–	–	–
26,5	–	–	–	–	–	–	34 650	37 000	263,4
28,0	30 100	32 300	248,9	–	–	–	–	–	–
28.5	–	–	–	36 200	38 600	266,7	39 850	42 550	302,8
30,0	34 400	36 850	284,3	–	–	–	–	–	–
30,5	–	–	–	42 150	45 000	322,3	45 350	48 400	344,4
32,0	38 850	41650	321,0	–	–	–	51 600	55 050	391,8
32,5	–	–	–	48 250	51 450	368,4	–	–	–
33,5	43 500	46 600	359,3	–	–	–	–	–	–

Для тросовой части буксируемых систем (БС) применяются стальные канаты. Тросовая часть, иначе называемая такелажем, является неотъемлемым элементом буксируемой системы любых конструкции и назначения. Как свидетельствует само название, тросовую часть изготовляют из троса (каната). Только в отдельных случаях, исходя из особых требований (по массе, влиянию на поисковую аппаратуру и др.), тросовую часть изготовляют из неметаллических канатов (органических или синтетических) [35, с. 39]. Как отмечает В. И. Егоров [176, с. 53–54],

в конструкциях буксируемых систем в подавляющем большинстве случаев применяют канаты двойной свивки — тросы (рис. 1.88).

Трос имеет ряд преимуществ перед другими типами буксиров. Он прост в изготовлении, дешев, обладает достаточно большой механической прочностью. Однако в этом случае необходимо использовать автономный измерительный комплекс, т. е. в носителе размещать датчики с регистрирующей аппаратурой или с устройствами, обеспечивающими передачу информации на судно без помощи кабеля [7, 8, 63]. Такой комплекс будет достаточно сложным и дорогим.

Свивка канатов может иметь два направления — правое и левое. У каната правой свивки отдельные пряди направляются слева вверх направо. У канатов левой свивки направление прядей справа вверх налево.

По виду свивки канаты подразделяются на канаты крестовой, односторонней и комбинированной свивки.

В канатах крестовой свивки, которую иногда называют обыкновенной свивкой, проволоки в прядях свиты в одну сторону, а пряди в канате в другую (противоположную) сторону. В случае односторонней свивки, которую называют также параллельной, проволоки в прядях и пряди в канате свиты в одном направлении. Наконец, при комбинированной свивке часть прядей расположена по крестовой, а часть по односторонней свивке через одну прядь.

По форме поперечного сечения различают канаты круглые и плоские. В буксируемых системах применяются почти исключительно круглые канаты [12, 11, 14, 31, 35].

В БС применяют канаты двойной свивки — тросы. При выборе проволоки для канатов необходимо учитывать, что более прочная, а следовательно, и более жесткая проволока может оказаться менее живучей, чем проволока, обладающая меньшим разрывным усилием [176, с. 54]. Опыт эксплуатации БС показал, что в ее тросовой части целесообразно применять канаты, изготовленные из проволоки с временным сопротивлением разрыву от $1{,}37 \cdot 10^9$ до $1{,}96 \cdot 10^9$ Па [137]. Чаще всего используют канаты 3-х и 6-прядные. Причем наиболее живучим в морских условиях оказался 3-прядный канат, поперечное сечение которого приближается к треугольнику, что способствует уменьшению вибраций, обусловленных вихреобразованием. Канаты многопрядные, форма поперечного сечения которых более всего приближается к кругу, разрушаются значительно быстрее.

Канаты, применяемые в тросовой части буксирумых систем, работают в условиях вибраций, которые появляются в результате действия гидродинамических сил, возникающих при буксировке канатов в воде. При этом проволока, имеющая

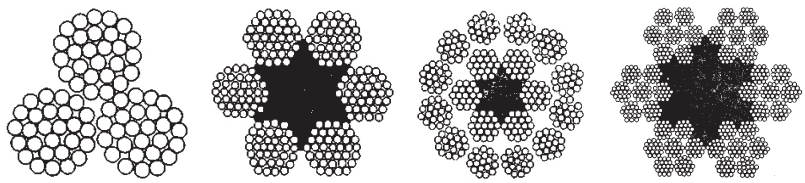


Рис. 1.88. Канаты двойной или тросовой свивки

большее временное сопротивление разрыву, а следовательно, более жесткая, оказывается иногда менее живучей, чем проволока, обладающая меньшим разрывным усилием. Это объясняется так называемой усталостью металла. Усталость металлов проявляется в том, что прочность последних сильно понижается при действии на них переменных усилий, повторяющихся через определенные промежутки времени. При этом металл разрушается при нагрузке, не только меньшей временного сопротивления металла разрыву, но часто даже не достигая предела упругости.

Характеристикой канатов является коэффициент плотности, равный отношению суммарной площади поперечных сечений всех проволок в канате к общей площади каната. В морском деле проволочные канаты применяются с коэффициентами 0,42–0,51 [137].

Удлинение от упругого растяжения стального каната вычисляется в соответствии с законом Гука. Значение модуля упругости Е меняется при изменении натяжения, а также в процессе работы со временем, увеличиваясь по мере обтяжки каната. На основании многочисленных работ для оценочных расчетов на стадии предварительного проектирования можно принять $E = (0{,}8 \pm 1{,}4) \cdot 10^5$ МПа в зависимости от конструкции каната [137]. Расчеты показывают, что при нагрузке, равной половине разрывного усилия, модуль упругости троса увеличивается в среднем на 65% от первоначального значения. Находившиеся в эксплуатации проволочные канаты имеют модули упругости (по некоторым рекомендациям) в 1,5–2 раза больше, чем новые. Удлинение стального троса при разрыве достигает 2–3%.

В морском деле используются **синтетические тросы,** свитые из нитей различных искусственных волокон: капрона, нейлона, лавсана, полипропилена и др. [183, с. 22]. По своему внешнему виду и конструкции синтетические тросы напоминают растительные. Они, как правило, делаются трехпрядными, чаще тросовой работы, реже — кабельной. При мягком волокне нити свиваются в каболки, каболки — в пряди и т. д. (например, капроновые тросы); при жестком — пряди свиваются непосредственно из толстых нитей (нейлоновые тросы). Синтетические тросы небольшой толщины могут изготовляться в виде плетеных шнуров.

Тросы из искусственного волокна легче растительных и значительно превосходят их в прочности. Так, например, капроновый трос прочнее манильского примерно в 2 раза и прочнее пенькового в 2,5–3 раза при одинаковой с ними толщине; при этом он легче равнопрочного ему пенькового троса примерно в 5 раз и стального — в 2 раза. Синтетические тросы обладают высокой эластичностью и гибкостью, которая сохраняется как в сухом, так и во влажном состоянии [183, с. 22].

Тросы сохраняют свои основные качества при температурах 0°С и ниже 0°С, что делает их весьма удобными при использовании в осенне-зимний период (резкое изменение качеств троса — уменьшение прочности до 70%, относительного удлинения на 20–25% — наблюдается только при очень низких температурах от –60 до –80°, что большого практического значения не имеет) [183, с. 22].

Синтетические тросы не боятся воздействия высокомолекулярных органических кислот, нефти и моющих средств, однако они портятся от соприкосновения с олифой, каменноугольным дегтем, фенолом и некоторыми маслами.

Тросы не подвержены гниению, действию грибков, морских водорослей и других микроорганизмов, что значительно упрощает и облегчает уход за ними в судовых условиях.

В то же время синтетические тросы обладают и рядом существенных недостатков. Обладая большой эластичностью (нейлоновый трос, например, при нагрузке, равной 0,5 разрывной, имеет общее удлинение около 35% и упругое — около 25%), эти тросы при разрыве, подобно резине, с большой силой отлетают назад по направлению натяжения к месту крепления, как говорят, «захлестывают», что создает большую опасность для людей, работающих с ними [183, с. 22]. В связи с этим, при возможности возникновения в тросе больших напряжений, необходимо принять все меры предосторожности для предотвращения несчастных случаев.

Синтетические тросы обладают способностью накапливать заряд статического электричества, которое возникает в тросах как при трении их о различные поверхности, так и в результате трения прядей и волокон между собой внутри троса. Искрообразование, сопровождающее разряд статического электричества, может привести к порче троса, а также быть опасным в пожарном отношении. Во избежание этого синтетические тросы подвергаются так называемой антистатической обработке, которая заключается в вымачивании их в течение суток в морской воде с соленостью не менее 20‰ или же в специальном солевом растворе (20 кг поваренной соли на 1000 л воды). Для поддержания антистатичности тросов необходимо не реже одного раза в 2 месяца скатывать их соленой забортной водой [183, с. 23]. В табл. 1.24 приводятся основные характеристики капронового троса сравнительно со стальным и растительным [183, с. 23].

Таблица 1.24. Основные характеристики капронового троса в сравнении со стальным и растительным тросами [183]

№	Наименование троса	Предел прочности, кгс/мм^2	Относительное удлинение, %	Размеры троса при одинаковом разрывном усилии, равном 16700 кг, мм		Вес 1 пог. м, кг
				диаметр	длина по окружности	
1.	Стальной	130-150	1-2	22,0	69	1,40
2.	Пеньковый	4,3-8,1	12-15	63,7	200	3,43
3.	Капроновый	27-30	20-25	33,4	105	0,66

Существенной особенностью синтетических тросов является их большая способность к скольжению. В результате этого в большинстве случаев обычные узлы и сплесни на синтетических тросах обладают плохой держащей силой. При такелажных работах с синтетическими тросами приходится применять особые при-

емы. Капроновый трос гигроскопичен, он впитывает воду в количестве до 4,3% (по весу), теряя при этом до 15% прочности. Несмотря на указанные недостатки, синтетические тросы, обладающие рядом очень важных преимуществ по сравнению с растительными и стальными, получают все более широкое применение на судах морского флота. Одними из первых на судах отечественного морского флота стали употребляться тросы, изготовляемые из капрона. Большим недостатком капроновых тросов является их чувствительность к воздействию солнечных лучей, под влиянием которых они быстро стареют и приобретают хрупкость.

Начиная с 60-х гг. XX в. отечественная промышленность начинает изготавливать тросы из лавсана, пропилена и других синтетических волокон, которые, обладая примерно теми же механическими качествами, что и капроновые, более устойчивы к воздействию прямых солнечных лучей и негигроскопичны (табл. 1.25) [183, с. 24]. Как отмечает С. Свенсон [199, с. 11], за рубежом ранее существовали четыре основных материала, используемых для изготовления синтетических тросов: полиамид, полиэфир, полиэтилен и полипропилен, встречающиеся под различными товарными названиями.

Тросы изготовляли тремя способами. Многонитевые тросы плели из пряжи, состоящей из тонких нитей, диаметр которых не превышал 0,1 мм. Такие тросы мягкие и гибкие. Мононитевые — из вытянутых непрерывных нитей диаметром более 0,1 мм — более жесткие с твердой и блестящей поверхностью. Многопленочные тросы сплетали из тонких пленочных нитей-полос.

Таблица 1.25. Свойства некоторых искусственных волокон [183]

№	Наименование волокон	Удельный вес, г/см^3	Предел прочности, кгс/мм^2	Относительное удлинение, %	Гигроскопичность (вес впитываемой воды к весу волокна), %	Температура размягчения, °С	Температура павления, °С
1.	Капрон	1,14	46–57	20–25	4,3	170[1]	215
2.	Лавсан	1,34	55–70	20–25	0,4	230[2]	250
3.	Полипропилен	0,92	77	31	0	94	–

[1] При нагреве свыше 65° прочность не обеспечивается.
[2] Прочность обеспечивается при нагреве до 200°.

Синтетические тросы на судах морского флота применяются в качестве буксиров, швартовов и в других случаях, когда требуется их высокая эластичность. Ранее промышленностью синтетические тросы изготавливаются в соответствии с ГОСТ 10293–62.

Швартовные канаты из синтетического волокна изготовляют из нитей капрона, нейлона или перлона. Отечественная промышленность вырабатывает капроновые канаты окружностью от 25 до 200 мм (табл. 1.26) [202, с. 157].

Таблица 1.26. Характеристика капроновых канатов [176]

Размеры каната, мм		Вес 100 пог. м, кг	Разрывное усилие каната, кг		Размеры каната, мм		Вес 100 пог. м, кг	Разрывное усилие каната, кг	
окружность	диаметр		повышенной прочности	нормальной прочности	окружность	диаметр		повышенной прочности	нормальной прочности
25	7,9	5,2	1260	1180	90	28,7	53,0	12400	11700
30	9,6	7,0	1860	1740	100	31,8	63,0	14850	13900
35	11,1	9,4	2140	2080	105	33,4	72,0	16750	15800
40	12,7	11,7	2450	2290	110	35,0	78,0	17950	16880
45	14,3	13,0	2760	2570	115	36,6	87,0	19500	18700
50	15,9	16,0	3570	3350	125	38,8	101,0	22300	21400
60	19,1	22,2	5450	5100	130	41,4	110,0	24400	23000
65	20,7	26,3	6330	5950	150	47,8	147,0	32000	30500
75	23,9	36,5	8650	8120	175	55,7	198,0	43000	40500
80	25,5	41,0	9100	8570	200	63,7	256,0	54000	51000

Канаты из капрона, нейлона и перлона применяли в китобойном промысле, а также в тех случаях, когда наряду с большой прочностью требуются максимальная гибкость и упругость при малом весе.

Полиамид, РА, амидпласт (найлон-66, перлон, энкалон, бринайлон, антрон, селон, рилсан) [199, с. 12]. Найлон впервые был получен В. Каротерсом в 1934 г. в США на заводе фирмы Дюпон. Изобретение зарегистрировано в 1938 г. Название этого материала стало видовым, так как вскоре другим ученым удалось получить новые соединения: найлон-6, найлон-707 и т.п. Применять найлоновые тросы начали в период Второй мировой войны. На таких тросах буксировали транспортные планеры во время авиадесантных операций. В конце 80-х гг. XX в. толстые найлоновые тросы используют повсеместно при буксировке как в портах, так и в открытом море, а также в качестве швартовных концов. На китобойных судах используют найлоновые гарпунные лини, превосходящие по качеству снасти из других материалов, применявшихся раньше. Найлоновые снасти получили широкое распространение в водных видах спорта и рыболовстве. Рыбаки-промысловики используют найлоновые буксируемые рыболовные снасти, найлоновые переметы для ловли лосося, а также найлоновые сети. Для этих целей найлон является оптимальным материалом, так как он гибкий, прочный и почти незаметен в воде. Выпускают также эластичные найлоновые снасти. Они растягиваются на 30% длины и возвращаются к первоначальным размерам после снятия нагрузки. Эластичность имеет значение при лове китов и буксировке, но при этом увеличивается степень риска.

Для изготовления тросов синтетическое сырьё вытягивается в тонкие гладкие нити, длина которых нередко равна длине всего троса. Торговое название получаемого таким способом материала — мононитевый (монофильный) найлоновый

шелк [199, с. 13]. Тонкие снасти, плетеные лини делают из нитевой пряжи. Поверхность такого пряденого найлона (филаментного) немного ворсистая, напоминающая поверхность хлопковых снастей. В торговле этот материал встречается под названием «шерстеподобный найлон» или «найлоновая шерсть». Этот материал сохраняет все свойства найлона, кроме прочности. Трехпрядный или иной сплетенный шерстеподобный найлон удобнее в работе, чем мононитевый. На таких тросах удобно вязать узлы и сплесни, как из снастей, изготовленных из обычных материалов. Тросы из найлонового шелка очень скользкие, поэтому узлы, сплесни и другие виды соединений должны выполняться с особой тщательностью. Труднее всего обращаться с тонкими рыболовными лесами, представляющими собой непрерывную вытянутую нить.

По прочности найлоновые тросы приблизительно в три раза превосходят манильские тросы высшего качества и примерно в 10 раз тросы из кокоса, несмотря на то, что вес их меньше [199, с. 13]. Большое значение это имеет для морских буксировок, где буксирные манильские тросы диаметром 38,1 см могут быть заменены найлоновыми диаметром 25,4 см.

Найлоновые тросы не впитывают воду. Найлон не гниет и не преет. С него легко смывается грязь, нет необходимости его протирать перед упаковкой. Температура плавления найлона-66 265°С, найлона-6 215°С, но повреждения бывают и при более низких температурах. Поэтому найлоновые тросы нельзя хранить на теплых поверхностях или на палубах, обшитых железными листами, предварительно не укрыв бухты чехлом. При низких температурах найлоновые тросы становятся жестче, но при обычных они неизменно гибкие и мягкие. Кроме буксировочных, швартовных концов и гарпунных линей из найлона изготовляют грузовые стропы и сетки, а также многопрядные якорные канаты.

Полиэстер, PETP, линейный этиленгликольтерефталатпласт [199, с. 13]. Термопласт, температура плавления 260°С. Торговые названия: терилен (Англия, Италия, Финляндия), диолен/тревар (ФРГ), полиэстер (Нидерланды), грисутен (ГДР), теторон (Япония), дакрон (США и Турция), тергаль (Франция и Испания), тезил (Чехия).

В конце 80-х гг. XX в. полиэстеровые снасти являлись самыми распространенными в парусном спорте. Как и найлон, полиэстер выпускают как в виде коротковолнистой шерстеподобной пряжи с мягкой поверхностью, так и тонкого непрерывного полиэстерового шелка. Полиэстер уступает найлону в эластичности, но сравнительно мало изнашивается. Для бегучего такелажа выпускают трехпрядные или сплетенные косицей из восьми прядей тросы, плотно свитые, гибкие, не изменяющие форму даже при значительной влажности. Для шкотов изготавливают соответствующие тросы, например, в 16-прядной оплетке, с сердечником из прямого шелка или с плетеным сердечником. Также выпускают тросы с двойной оплеткой, причем внешняя оплетка служит для предохранения троса от износа. Тросы для шкотов генуэзских стакселей большой площади имеют самую плотную свивку, их используют также в качестве грузовых стропов. Восьмипрядные сплетенные косицей тросы используют для легких парусов. Швартовые концы для яхт

и яликов делают из самого прочного найлона или полиэстера. Специальный линь из прямого полиэстерного шелка, покрытого полиэтиленоподобным материалом, используется прежде всего как спасательный конец. Линь снабжен наконечником из нержавеющей стали. Для линя диаметром 7 мм разрывное усилие составляет около 5 кН [199, с. 14].

Канаты для спортивных судов производит известная немецкая фирма Gleistein Ropes [273, с.71]. В настоящее время эта фирма является одним из мировых лидеров в сфере производства канатов для яхтинга. Это подтверждается сотрудничеством с такими именитыми яхтостроительными фирмами, как PERINI Navy, Larssen, A & R и Royal Huisman.

Многие известные суперяхты и гоночные яхты, такие как парусные EOS, ATHENA, MSRABELLA V, KOKOMO 1, 2 и 3, ATHOS, EENDRACHT, PASA, VALQUEST, REBECCA и моторные PELORUS, OCTOPUS, RISING SUN, укомплектованы продукцией фирмы Gleistein Ropes и это только небольшая часть существующего флота (рис. 1.89) [273].

Для парусного спорта выпускают синтетическую парусную ткань из полиэстера. Ширина полотнища равна 91,5 см. Существует несколько разновидностей такого материала, различающихся по весу — от 180 до 320 г/м^2. Для спинакеров выпускают особую тонкую найлоновую парусную ткань весом 48 г/м^2.

Якорные канаты [273]. В качестве якорных нельзя использовать плавающие. Из трех основных материалов, используемых в производстве канатов (полиамид, полиэстер и полипропилен), плавающие изготовлены из полипропилена. Наиболее подходящие материалы для таких — полиэстер и полиамид. У первого по сравнению с полиамидом больший удельный вес и немного меньшая прочность на разрыв.

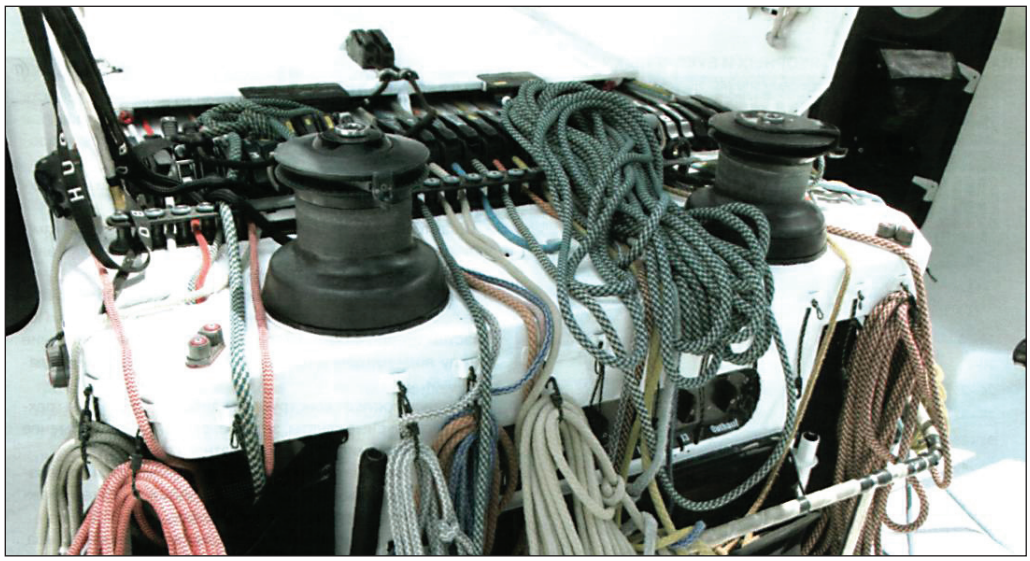


Рис. 1.89. Разнообразие синтетических тросов, применяемых на яхтах

По конструкции для якорных канатов используют либо крученые трехпрядные, либо преимущественно круглые в сечении плетеные из 8, 12, 16, 24, 48 прядей. Плетеные восьмипрядные квадратные в сечении практически не используются как якорные канаты.

Названия канатов фирмы Gleistein Ropes тесно связаны с конструкцией и материалом [273, с.71]:

– TWIST в названии означает трехпрядный крученый канат.

– SQUARE — восьмипрядный квадратного плетения.

– ONE — сплетенный из 8, 12, 16, 24, 48 круглого сечения без сердечника.

– TWIN — многопрядный канат с сердечником и рубашкой.

Приставка GEO в начале названия обозначает, что канат изготовлен из стандартных материалов — полиамида, полиэстера или полипропилена.

И дальше в названии добавлено наименование материала — POLYAMID (полиамид), POLYESTER (полиэстер), GEOPROP (полипропилен мультифиламент).

Таким образом, например, название троса GeoTwist GeoProp расшифровывается как трехпрядный полипропиленовый, GeoTwin Poliamid — многопрядный с сердечником из полиамида, а GeoSquare Polyester — восьмипрядный квадратного плетения из полиэстера.

Буксирные канаты [273]**.** Такие, в отличие от якорных, должны быть плавающими и эластичными. Эластичность буксира позволяет избежать резких рывков во время буксировки и, как следствие, избегать разрушений буксирных устройств обеих яхт. Плавающими они должны быть потому, чтобы при падении за борт не намотать буксир на винт и быстро подобрать его на борт.

Наиболее подходящий канат такого назначения — трехпрядный полипропиленовый.

Швартовые канаты [274]. К этим канатам основными требованиями являются общая прочность и при ударных нагрузках эластичность и долговечность.

Наиболее прочны и эластичны канаты из полиамида. Менее прочны, но более эластичны канаты из пропилена. Полиэстер по прочности занимает промежуточное значение между полиамидом и полипропиленом, но наименее эластичный.

В зависимости от конструкции наиболее эластичны трехпрядные крученые канаты, затем многопрядные и наименее эластичны восьмипрядные квадратного плетения.

Швартовые канаты длительное время находятся под воздействием ультрафиолета солнечных лучей, и поэтому важным фактором является стойкость материала к УФ. Самая высокая стойкость к УФ у канатов из полиэстера. Менее стойки из полиамида. Полипропиленовые канаты достаточно стойкие, но все же уступают двум первым материалам.

Для лучшей защиты от воздействия УФ канаты окрашивают в различные цвета. В отличие от шкотовых и фаловых канатов для парусных яхт цветовое различие швартовых канатов имеет большее эстетическое значение. В основном бывают черные, синие, темно-синие, серые, «бронзовые». Выбор цвета — дело вкуса владельца.

Разновидностью швартовых канатов являются становые (mooring line). Для них наиболее подходящими будут трехпрядные канаты из полиамида (GeoTwist GeoProp). Конструкция плетения каната влияет не только на технические характеристики, но и на эстетические. Владельцы дорогих яхт все больше отдают предпочтение многопрядным канатам, затем восьмипрядным квадратного плетения, а потом уже трехпрядным крученым. В табл. 1.27 [274] приведены виды плетения наиболее часто применяющихся тросов фирмы Glenstein Ropes.

Одинаковые по конструкции канаты из полиэстера и полиамида будут примерно в одной цене, а полипропиленовые — на 15–20% дешевле. В зависимости от конструкции дороже будут многопрядные, а квадратного плетения и крученые — дешевле. Окрашенные канаты — дороже белых. Материал Hempex разработан из полипропилена для применения на современных яхтах-репликах для имитации пеньковых тросов (Spleitex OR), плавает. Соответствуя им по цвету, обладает вполне современными характеристиками (табл. 1.28) [274, с. 81].

Характеристики материала Hempex приведены в табл. 1.29 [274, с. 81].

В таблице 1.30 приводится применение тросов фирмы Glenstein Ropes [274, с. 81].

Таблица 1.27. Виды плетения наиболее часто применяющихся тросов фирмы Glenstein Ropes

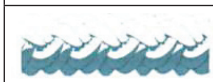
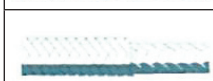
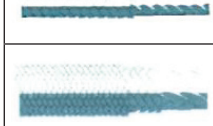
	GeoTwist — трос трехпрядный крученый
	GeoSquare — трос восьмипрядный, «квадратного» плетения, не скручивается кольцами, красивый внешний вид
	GeoOne — трос, сплетенный из различного числа небольших прядей, без оплетки («рубашки»)
	GeoTwin — трос с сердечником, защищенный оплеткой
	MegaOne — трос, сплетенный из различного числа небольших прядей (подобно GeoOne) из высокомодульного материала
	TaperTwin — трос с сердечником из высокомодульного материала (подобный GeoTwin), защищенный оплеткой. Разработан для гоночных яхт — можно легко снять оплетку для уменьшения веса троса
	MegaTwin — трос (подобный GeoTwin), с сердечником из высокомодульного материала с промежуточным слоем из полистирола для лучшего соединения сердечника и оплетки

Таблица 1.28

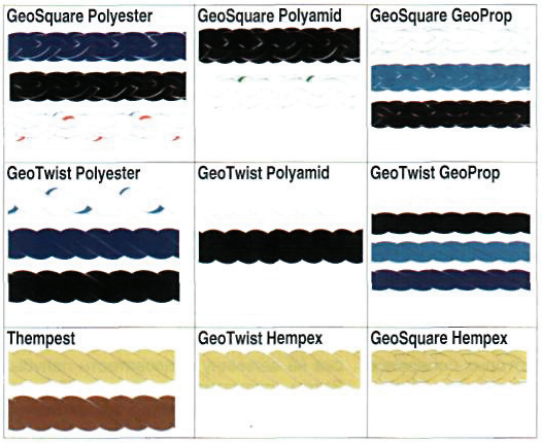


Таблица 1.29. Характеристики материала Hempex

Сопротивление разрыву	cN/dtex 5-6	Температура плавления, °C	165–175
	daN/mm^2 50-55	Стойкость к УФ-излучению	отличная
Относительное удлинение при разрыве, %	14–17	Стойкость к кислотам	отличная
Удельный вес, г/см^3	0,91	Стойкость к щелочам	хорошая
Модуль-E, daN/mm^2	400	Стойкость к нефтепродуктам	отличная
Прочность с узлом, %	50	Текучесть	при большой нагрузке

Таблица 1.30. Применение тросов фирмы Glenstein Ropes

Назначение	Наименование															
	GeoTwin Polyester	Bavaria/Dockline	GeoX-tend	GeoTwin Polyamid(e)	GeoOne Polyester	GeoOne Polyamid (e)	GeoOne Hempex	GeoSquare Polyester	GeoSquare Polyamid(e)	GeoSquare GeoProp	GeoSquare Hempex	GeoTwist Polyester	GeoTwist Polyamid(e)	GeoTwist GeoProp	GeoTwist Hempex	Ester Color
Флаг-фал					×	×	×									×
Кранцы					×	×	×							×	×	×
Швартов	×	×	×	×	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	
Шпринт	×	×	×	×	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	
Буксир	×	×	×	×	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	
Якорный	×	×	×	×	×	×		×	×			×	×			

Правильный выбор необходимых тросов обеспечит их длительное применение и повысит безопасность судна в различных ситуациях.

Полиэтен, HDPE, этенпласт, HD, политен (ранее назывался полиэтилен) [199, с. 14]. Термопласт, температура плавления около 180°С. Волокно выпускают только мононитевым. Из него получают долговечные снасти с гладкой поверхностью. Разрывное усилие этих тросов в 1,5 раза больше, чем манильских, для влажных тросов — в 1,7 раза. Полиэтен не тонет в воде, поэтому его удобно использовать при швартовке: многонитевый — для подъема тяжелых грузов, а трехпрядный или сплетенный из восьми прядей — для более легких грузов.

Полипропен, PP, пропенпласт, полипропилен, мераклон [199, с. 15]**.** Полипропен получен в 1955 г. профессорами Г. Натта (Италия) и К. Циглером (ФРГ). Оба ученых удостоены в 1963 г. Нобелевской премии за свои заслуги в области химии. Температура плавления полипропена около 165°С.

Широкое применение на судах получили грубые швартовные тросы из полипропена. Многопрядиый трос из непрерывного волокна по прочности почти вдвое превышает соответствующий манильский трос. Трехпрядные или сплетенные косицей тросы отличаются низкой стоимостью и используются повсеместно.

Широко применяются также тросы из пленочного полипропена с плоскими волокнами из тонкой пленки. Разрывное усилие у таких материалов более высокое. Пленочный полипропен не тонет, что в значительной степени облегчает работы при швартовке и буксировке. Мокрый трос сохраняет свою прочность и гибкость. Однако пленочный полипропен быстро изнашивается, поэтому рекомендуется предварительно осматривать утки, кнехты, лебедки и устранять на них острые ребра и выступы, защищать трущиеся участки троса каким-либо способом. Для временного покрытия лучше всего пригодны кожа, парусина или пластмассовые шланги.

Синтетические волокна сделали возможным применение совершенно новых цветовых обозначений на тросах.

Синтетические волокна легко различаются по следующим признакам [199, с. 15]. Если образец не тонет в воде, значит он изготовлен из полиэтена, если тонет, то это либо полиамид, либо полиэфир. Образцы подвергают также воздействию открытого огня. Если при сгорании дым идет темный и образец плавится, то это полиэфир, если он плавится без изменения окраски, то это полиамид, полипропен или полиэтен. Если образец смочить 90%-ным фенолом или 85%-ной муравьиной кислотой (несколько капель на стеклышке) и волокно растворится, то это полиамид, если образец не растворится — полиэфир; если не растворится и сохранит гибкость — полипропен или полиэтен. Неокрашенный найлоновый трос имеет между прядями светлую окраску, трос из полиэфирного шелка отличается большим металлическим блеском.

В рыболовстве большинство орудий лова изготавливаются из сетематериалов и канатно-веревочных элементов, сырьем для производства которых служат волокнистые материалы. Волокнистые материалы, применяемые в рыболовстве, должны обладать повышенной прочностью и стойкостью к механическому износу, противогнилостной стойкостью, эластичностью, постоянством свойств при намокании и т.д. [189]. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют синтетические волокна.

В рыболовстве все синтетические волокна делятся на гетероцепные и карбоцепные. Из гетероцепных наибольшее распространение в промышленном рыболовстве получили полиамидные волокна, к которым относятся капрон, нейлон дедерон, амилан, перлон, анид и др., и полиэфирные волокна, такие как лавсан, терилен, дакрон, тетерон и т.д.

Из карбоцепных в рыболовстве используют несколько групп: полиофениловые (полипропилен, винол), поливинилспиртовые (куралон, винилон, винол), поливинолхлоридные (хлоран, саран).

Из веревочно-канатных изделий в рыболовстве применяют шнуры, веревки, канаты синтетические, стальные и комбинированные.

Канаты синтетические [189]. В рыболовстве обычно применяют канаты тросовой работы, в которых каболки скручены в пряди, а 3 и 4 пряди образуют канат. Толщина синтетических канатов характеризуется не диаметром, а длиной окружности. Этот показатель можно определить, если обернуть канат полоской бумаги, проколоть её иглой и измерить расстояние между проколами. В отечественном рыболовстве наиболее широкое распространение получили трехпрядные капроновые канаты длиной окружности от 25 до 125 мм и разрывной нагрузкой от 11,8 до 240 кН. Относительное разрывное удлинение капроновых канатов очень велико и достигает 50 %.

В рыболовстве наиболее широкое распространение получили трехпрядные капроновые канаты длиной окружности от 25 до 125 мм и разрывной нагрузкой от 11,8 до 240 кН. Относительное разрывное удлинение капроновых канатов очень велико и достигает 50 %. В рыболовстве в основном применяют стальные канаты диаметром от 8 до 48 мм. Из стальных канатов изготавливают элементы рыболовных систем, которые несут большие нагрузки и должны незначительно при этом изменять свои линейные размеры.

Буксирный трос — стальной, растительный или синтетический трос, применяющийся для соединения буксирующего судна с буксируемым объектом. Длина буксирного троса устанавливается в зависимости от условий буксировки (открытое море, проливы, подходы к портам), мощности буксирующего судна, а также от состояния погоды [12, 36, 183]. На специальных буксирных судах, спасателях и ледоколах применяют буксирный трос больших диаметров, они обычно находятся на автоматических буксирных лебедках. При буксировке больших объектов (плавдоки, краны и т. п.) используют буксирные линии, состоящие из 2–3 смычек якорной цепи (обычно со стороны буксируемого объекта) и стального троса (со стороны буксирующего судна), или из стального троса со вставкой из синтетического. Возникающие в линии усилия гасятся за счет ее провисания или упругости синтетической вставки. При буксировках судов в порту в качестве буксирного троса применяют швартовные тросы. Один конец троса с огоном закладывают на гак буксира, другой крепят на кнехтах буксируемого судна. Иногда буксирный трос принимают с буксира. Длину буксирного троса на буксировках в море в сравнительно тихую погоду принимают в зависимости от мощности буксирующего судна: около 200 м для судов малой мощности и до 400 м для судов большой

мощности. Буксирный трос на буксировке плавдока достигает 700 м. При снятии судов с мели длина буксирной линии доходит до 1300 м. Требования к буксирному тросу регламентировались Правилами Регистра СССР [193, с. 100].

Кабель-трос — электрический кабель, обладающий достаточной механической прочностью для буксировки с его помощью подводных объектов, например, привязных ПА. Совмещает функции буксирного троса (передача механических усилий) и электрического кабеля (передача электроэнергии и информации) [193, с. 282].

В последнее время наиболее используемыми в подводных привязных системах (ППС) и в подводных буксируемых системах (ПБС) в качестве ГС являются кабель-тросы (КТ). Их появление стало возможным благодаря использованию новых материалов и технологий изготовления, что позволило соединить воедино трос и кабель и получить при этом свойства, которыми они не обладали по отдельности [396].

Особенностью современных КТ для подводных исследований является то, что они способны передавать на подводные и буксируемые объекты не только электроэнергию, но и управляющие импульсы, обеспечивая связь судна-носителя с буксируемым (или подводным привязным объектом). При этом они могут выполнять и функции силового элемента — троса, в качестве которого ранее использовался стальной трос.

Попытки создания кабелей делались еще в начале XIX в. Пригодные для эксплуатации кабели связи (КС) появились в связи с широким применением электрической свечи русского учёного П. Н. Яблочкова. Затем с развитием центральных электрических станций стали делать КС и на более высокие напряжения (до 6000 В). В конце XIX в. сооружаются городские кабельные сети в Петербурге и Москве. В 1912 г. созданы первые КС на напряжение 20000 В, а в 1930 г. ленинградский завод «Севкабель» выпустил КС на 110000 В, а затем стал производить КС и на 220000 В [210, с. 223].

Появление кабелей в морском деле можно отнести к 1850 г., когда 28 августа паровой буксир «Голиаф» за один день проложил первый морской кабель, соединивший английский город Дувр с французским городом Кале. Кабелем его можно было назвать лишь условно. Это была медная жила диаметром *2* мм, покрытая слоем гуттаперчи толщиной 5,5 мм. По проводу толщиной с мизинец сумели передать лишь несколько слов, после чего он был случайно оборван рыбачьей снастью [283, с. 56].

В последнее время перечень КТ, используемых в подводных исследованиях, намного расширился и требует создания их классификации, что позволит проектанту лучше ориентироваться во всём их многообразии. Кроме того, классификация как база данных служит основой для решения научных задач, например, по совершенствованию проектирования ГС: при использовании алгоритма проектирования ГС ППС и ПБС (и выборе новой ГС) наличие классификации современных КТ позволит более правильно осуществлять подбор необходимого КТ для проектируемой ППС либо проектировать новые КТ.

Автор, изучая данную проблему [396], не обнаружил сколько-нибудь приемлемой классификации КТ. Существуют отдельные, упрощённые подходы к классификации современных КТ для подводных исследований.

В [176] приводится описание буксирно-кабельной части ПБС, однако не рассмотрены конструкции и классификация КТ для ПБС (очевидно, их в то время просто не существовало).

В [137, с. 39] рассмотрена тросовая часть ПБС (стальные и искусственные канаты и тросы), здесь же [137, с. 41] рассмотрена схема сечения грузонесущего кабеля (ГК). Даются ссылки на производителей ГК: американскую фирму «Amergraph» и французскую фирму «Les cables de Lyon».

Кабели, предназначенные для прокладки под водой и подводных работ, изготовляют с медными токопроводящими жилами, резиновой изоляцией и защитной оболочкой из резины [197]. Для повышения механической прочности в кабелях марок КЭС, КРП, КСБШУ и КСДП предусмотрен трос (сердечник) из стальных проволок, изолированный резиной. Кабели марок СПК, КЭС, КСДП и КРП герметизированы в продольном направлении. Наименование марок и основные сведения для предварительного выбора кабеля при проектировании приведены в [197, табл. 1 на с. 51].

В.С. Ястребов [105, с. 92] использует термин трос-кабель. Он отмечает, что в качестве грузонесущего элемента используют как обычные тросы, находящиеся в центре кабельной линии (кабель-трос), так и наружную стальную двухслойную оплётку с информационными и электрическими силовыми жилами кабельной линии внутри. При больших глубинах буксировки предпочитают трос-кабели, которые обладают большей грузонесущей способностью, надёжны в эксплуатации, а их конструкция статически устойчива.

В [444] приведена классификация кабелей и проводов, признаки классификации следующие: назначение, величина линейного рабочего напряжения кабеля, тип изоляции, по признакам материала проводящих жил передаваемой энергии или информации, порядок передаваемой через кабели мощности, величина напряжения, тип изоляции, место прокладки и т.д.

В [14, 122] приведены конструкции отдельных КТ и рассмотрены основы проектирования ППС, задача создания классификации КТ не ставилась.

В качестве буксира в ПБС могут использоваться трос, кабель, буксирно-кабельная часть, кабель-трос. Трос имеет ряд преимуществ перед другими типами буксиров. Он прост в изготовлении, дешев, обладает достаточно большой механической прочностью. Однако в этом случае необходимо использовать автономный измерительный комплекс, т. е. в носителе размещать датчики с регистрирующей аппаратурой или с устройствами, обеспечивающими передачу информации на судно без помощи кабеля. Такой комплекс будет достаточно сложным и дорогим [276].

В [441] приведен перечень морских кабелей, изготавливаемых Азовской Кабельной Компанией (таблица 1.31).

Таблица 1.31. Перечень морских кабелей, изготавливаемых Азовской морской компанией

КАБЕЛИ МОРСКИЕ				
Тип	**Марка кабеля**	**Конструкция исполнения**	**Преимущественная область применения**	**Технические условия**
Герметизированные для высокочастотной связи	КСТ-9Г	Кабель судовой телевизионный с полиэтиленовой изоляцией, герметизированный, вид климатического исполнения В. Состоит из коаксиальной пары с номинальным сечением проводников 0,35 мм^2, двух служебных экранированных жил номинальным сечением 0,75 мм^2	Кабель предназначен для передачи электрической энергии и осуществления высокочастотной связи в аппаратуре в условиях нестационарной прокладки, номинальное электрическое напряжение: коаксиальная пара — 2000 В постоянного тока; служебных экранированных жил — 220 В переменного тока частотой до 400 Гц или 380 В постоянного тока	ТУ 16-705.442-86
	КТСГМ-40	Кабель телевизионный камерный с полиэтиленовой изоляцией в поливинилхлоридной оболочке судовой, вид климатического исполнения УХЛ. Состоит из трёх коаксиальных пар, двух высоковольтных жил и 43 служебных жил, в том числе 23 экранированных жил	Кабель предназначен для работы в условиях фиксированного монтажа в диапазоне температур от –40°С до +70°С при переменном напряжении до 250 В частоты до 400 Гц или постоянном напряжении до 350 В (служебные жилы), постоянном напряжении до 2000 В (коаксиальные пары), постоянном напряжении до 2200 В (высоковольтные жилы). Может работать в условиях морской воды при статическом гидравлическом давлении не более 3,9 МПа	ТУ 16-505.596-82
	СПВ-50	Кабель радиочастотный коаксиальный судовой герметизированный с внутренним проводником, токопроводящая жила скручена из семи медных проволок номинальным диаметром 1,33 мм с изоляцией из полиэтилена высокого давления, оплёткой внешнего проводника из медных проволок диаметром 0,30 мм, оболочкой из поливинилхлоридного пластиката. В промежутках между всеми конструктивными элементами кабеля, за исключением промежутков между обмоткой, лентой и оболочкой, должен быть заполнитель из герметизирующего состава	Кабель предназначен для осуществления высокочастотной связи в диапазоне частот от 1700 МГц при стационарной прокладке в воздухе и морской среде. Номинальное испытательное переменное электрическое напряжение номинальной частотой 50 Гц в течение 1 мин. Изоляции коаксиальной пары 5000 В, электрическое сопротивление изоляции кабеля, пересчитанное на длину 1 км и при температуре 20°С, не менее 1000 МОм, волновое сопротивление кабеля при номинальной частоте 10 МГц 50±5	ТУ У 31.3-32972989-001:2005
Грузонесущие	КГР-7-1,2М	Кабель-трос грузонесущий с изоляцией из облучённого полиэтилена в резиновой оболочке семижильный	Кабель-трос грузонесущий модернизированный с номинальным разрывным усилием 12 кН (1200 кгс), напряжением силовых жил 2000 В и для телефонных жил 500 В	ТУ У 31.3-00217099-010-200
	КГМГ	Кабель с медными токопроводящими жилами и грузонесущим элементом в виде армидных нитей с оболочкой из полиуретана	Кабель предназначен для передачи информационных сигналов и питания погружных устройств напряжением 380 В, работающих в морских условиях при многократных спусках-подъёмах	ТУ У 31.3-00217099-026:2005

Окончание таблицы 1.31

Тип	Марка кабеля		Конструкция исполнения	Преимущественная область применения	Технические условия
Грузонесущие	МК	МКО, МКО-1	Кабель с силовыми и вспомогательными медными жилами и с одной сигнальной экранированной парой	Кабель предназначен для буксировки и питания подводных систем с номинальным рабочим напряжением силовых жил 660 В, вспомогательных жил 50 В, рабочей частотой сигнальной пары 115 кГц	ТУ У 31.3-00217099-020:2005
		МК-2	Кабель с силовыми и вспомогательными медными жилами и с двумя сигнальными экранированными парами	Кабель предназначен для буксировки и питания подводных систем с номинальным рабочим напряжением силовых жил 660 В, вспомогательных жил 50 В, рабочей частотой сигнальной пары 115 кГц	ТУ У 31.3-00217099-020:2005
Специальные подводные	КЭСм		Кабель со стальным канатом, с отдельно экранированными медными жилами	Для питания сигнальных устройств, работающих под водой при переменном напряжении до 220 В частотой до 400 Гц или постоянном напряжении до 400 В	ТУ У 31.3-00217099-037.2006
	КРПм		Кабель со стальным канатом, с медными жилами	Для питания электроустановок, работающих под водой при переменном напряжении до 220 В частотой до 400 Гц или постоянном напряжении до 400 В	ТУ У 31.3-00217099-037.2006
	КСБШу		Кабель для сигнальных буёв со стальным канатом, с медными жилами	Для питания сигнальных буёв переменным напряжением до 220 В частотой до 400 Гц или постоянном напряжении до 400 В	ТУ У 31.3-00217099-037.2006
	ГВРКм		Кабель глубоководный со стальным канатом с медными и сталемедными жилами	Для питания подводных электроустановок, работающих под водой при переменном напряжении до 380 В частотой до 50 Гц или постоянном напряжении до 700 В, с одновременным осуществлением громкоговорящей телефонной связи при переменном напряжении до 127 В частотой до 400 Гц или постоянном напряжении до 250 В	ТУ У 31.3-00217099-037.2006
	КСТм		Кабель сигнально-телефонный, со сталемедными жилами	Для сигнальной и телефонной связи, работающей под водой, при переменном напряжении до 127 В частотой до 400 Гц или постоянном напряжении до 250 В	ТУ У 31.3-00217099-037.2006
	КСТГм		Кабель сигнально-телефонный, со сталемедными жилами, герметизированный	Для сигнальной и телефонной связи, работающей под водой, при переменном напряжении до 127 В частотой до 400 Гц или постоянном напряжении до 250 В	ТУ У 31.3-00217099-037.2006
	КВТм		Кабель водолазный, со сталемедными жилами	Для телефонной связи, работающей под водой, при переменном напряжении до 127 В частотой до 400 Гц или постоянном напряжении до 250 В	ТУ У 31.3-00217099-037.2006
	КВТГм		Кабель водолазный, герметизированный, со стальным канатом, с медными и сталемедными жилами	Для производства водолазных работ с одновременным осуществлением телефонной связи и управления соответствующей аппаратурой. Медные жилы предназначены для работы при переменном напряжении до 220 В частотой до 50 Гц при постоянном напряжении до 400 В, а сталемедные жилы — при переменном напряжении до 127 В частотой до 400 Гц или постоянном напряжении до 250 В	ТУ У 31.3-00217099-037.2006

В [270] рассмотрены конструкции волоконно-оптических кабелей (ВОК) для подводных линий связи, которые классифицированы следующим образом (табл. 1.32).

Конструкция подводных оптических кабелей связи выбирается в зависимости от вида водной системы (река, озеро, залив, островные протоки) и существующего риска, связанного с рыболовством [445, см. табл. 1.33].

Внешние ВОК прокладываются в разных условиях и могут подвергаться сильным природным воздействиям, поэтому при выборе кабеля необходимо предусматривать все возможные воздействия окружающей среды, в том числе обусловленные деятельностью человека [444, см. табл. 5–7].

Приведенная в [440, с. 25] классификация кабелей в известной мере условна, однако позволяет систематически представить сведения о кабелях.

Классификация ВОК для подводной прокладки приведена на рис. 1.90 [444].

Предельная глубина, которой может достигнуть ПБС, будет зависеть от отрицательной плавучести буксира, скорости буксировки, диаметра буксира и, наконец, от его механической прочности.

Таблица 1.32. Волоконно-оптические кабеля (ВОК) для подводных линий связи [270]

№	Тип кабеля	Характеристики	Глубина укладки, м
1.	Лёгкий кабель (Light weight) LW	Глубоководный кабель для областей, где отсутствует риск значительных повреждений	< 8000
2.	Защищённый лёгкий кабель (Light weight protected) LWP	Лёгкий кабель с защитой от механических повреждений. Подходит для областей с пересечённой местностью	< 3500
3.	Бронированный лёгкий кабель (Single armour light) SLA	Относительно лёгкий кабель для областей, где возможно зарывание кабеля в траншею и риск внешних повреждений минимален	< 1500
4.	Бронированный кабель (Single armour) SA	Для областей, где возможно ограниченное зарывание кабеля	< 1500
5.	Дважды бронированный кабель (Double armour) DA	Сильно защищённый кабель для применения в прибрежных областях и местах, где зарывание кабеля невозможно и большой риск повреждения кабеля тралами и сетями рыболовных судов	< 500
6.	Кабель для прокладки в скалах (Rock armour) RA	По свойствам схож с дважды бронированным кабелем, но с повышенным сопротивлением и более гибкий, предназначен для укладки на волнистом каменном дне и в областях с высокой рыболовной активностью	< 200

Таблица 1.33. Результаты расчётов кабель-тросов (КТ) различных типов [445]

№ п/п	Тип КТ	Количество жил	Диамер КТ d, мм	Отрицательная плавучесть P, кг/м	Разрывное усилие Q, кг	Скорость буксировки, узл.	Предельная глубина H_{max}, м	Предельная длина L_{max}, м
1.	КТО-4 (5)	3	22,8	0,342	3600	6 9 12 15	675 330 170 97	2450 1830 1300 910
2.	КСБ-6	7	16,5	0,586	6000	6 9 12 15	1340 775 435 220	4000 3540 2700 2200
3.	КОБД-6	1	9,0	0,255	6000	6 9 12 15	2800 1490 740 410	9850 7930 5400 3800
4.	КОБД-10	1	9,9	0,334	1000	6 9 12 15	4000 2180 1170 682	12800 10700 7850 5700

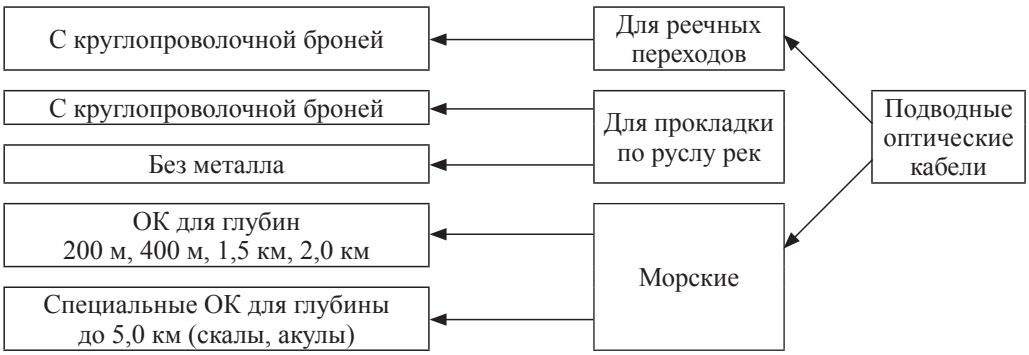


Рис. 1.90. Классификация подводных ОК

Кабели по признакам материала проводящих жил передаваемой энергии или информации делят на две группы:

– кабели электрические с металлическими жилами;

– кабели с оптическими волокнами (могут иметь и дополнительные металлические токопроводящие жилы).

Кабели электрические с металлическими жилами классифицируют по порядку передаваемой через кабели мощности, величине напряжения, типу изоляции, назначению и т.д. В соответствии с этим различают:

– кабели силовые низкого, среднего и высокого напряжения;
– кабели силовые гибкие;
– кабели управления;
– кабели контрольные;
– низковольтные провода и шнуры;
– кабели и провода связи;
– кабели радиочастотные;
– кабели специальные и др.

По назначению выделяют кабели:

– для передачи и распределения электроэнергии в осветительных и силовых электроустановках — силовые кабели;
– для проводной связи и сигнализации — кабели связи;
– для передачи энергии и сигналов на радиочастотах — радиочастотные кабели;
– для создания цепей контроля, сигнализации — контрольные кабели и др.

Силовые кабели по типу изоляции различают:

– кабели силовые с бумажной изоляцией, в том числе пропитанные и маслонаполненные;
– кабели силовые с пластмассовой изоляцией;
– кабели силовые с резиновой изоляцией.

По величине линейного рабочего напряжения кабели силовые подразделяют на:
– кабели на напряжения 1...10 кВ;
– кабели на напряжения 20...35 кВ;
– кабели на напряжения 110...500 кВ.

В зависимости от места прокладки выделяют кабели для прокладки:
– в земле (траншеях);
– в воздухе;
– в помещениях;
– под водой.

В [442] приведена классификация коаксиальных кабелей. Рассматриваемые признаки классификации: конструктивные и электрические характеристики, наличие внутреннего проводника, наличие диэлектрика, наличие экрана, наличие троса (стальная проволока), наличие внешней оболочки (ПЭ, ПВХ), стандартная упаковка, волновое сопротивление, скорость распространения, затухание (на определённой частоте). Как видим, количество признаков незначительно.

В [443] приведены устройство, история создания, применение, классификация и обозначения коаксиальных кабелей.

Как отмечает В.В. Васильков [265], за рубежом общепризнанных руководств по проектированию кабелей для связи подводных аппаратов с судном обеспечения пока не разработано.

Наиболее распространенными среди электромеханических кабелей, предназначенных для буксировки и обеспечения работы подводной аппаратуры, являются коаксиальные. Так, кабель-буксир глубоководной поисковой системы, разработанный научно-исследовательской лабораторией ВМС США [298, с. 89], при-

менялся при поиске ПЛ и других затонувших объектов на глубинах до 6000 м. Наружный диаметр его 17,3 мм, разрывное усилие 16,0 тс, масса погонного метра 1,03 кг (рис. 1.91).

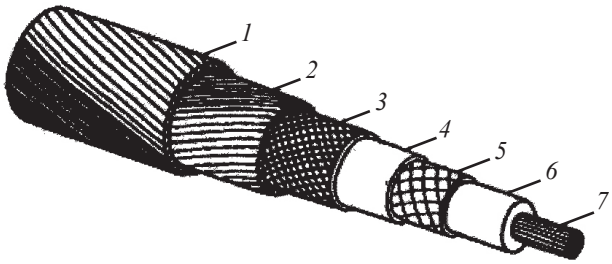


Рис. 1.91. Конструкция кабель-буксира системы NRL [298]:
1 — наружный повив из 24 проволок диаметром 1,8 мм; *2* — внутренний повив из 24 проволок диаметром 1,4 мм; *3* — подушка-оплётка из найлона; *4*, *6* — полиэтиленовые оболочки; *5* — медный экран-оплётка; *7* — центральный многожильный медный проводник

При разработке новых кабелей особое внимание обращается на выполнение следующих требований: сведение к минимуму скручивающих усилий, обеспечение высокой прочности и гибкости, стойкости к коррозии и истиранию, радиальной и продольной герметичности, простоты крепления датчиков к кабелю [298, с. 89]. В качестве обязательного условия выдвигается требование о снижении массы кабеля.

В [265] отмечается, что электромеханические подводные кабели должны удовлетворять следующим требованиям:

– строительная длина от 180 м до нескольких километров;
– наружный диаметр от 2,5 до 25,4 мм;
– рабочая глубина от 0 до 6000 м;
– срок службы от нескольких дней до 20 лет;
– рабочее натяжение от 2,5 до 4500 кгс;
– масса в воде ±0,15 кг/м.

В качестве перспективных рассматривались кабели, в которых вообще не используются металлические материалы, ни в качестве прочных элементов, ни в качестве электропроводников (например, кабель с полиэтиленовой изоляцией, содержащий токопроводящий полиэтиленовый гибкий стержень). Недостаток таких кабелей — высокое электрическое сопротивление. Использование многожильных кабелей (коаксиальных, витых пар и проч.) для передачи данных при современном уровне развития устройств сбора информации ведет к увеличению числа жил, а значит, и диаметра кабеля. Переход на высокоскоростной канал связи и передачи данных позволяет передавать с ТПА телеметрию, гидролокационные данные и видео высокого разрешения в реальном времени по длинному кабелю (до 10000 м).

Конструкция и материалы кабеля для подводных телеуправляемых манипуляционных роботов (ПТМР) должны быть такими, чтобы кабель оказывал наименьшее влияние на подводный аппарат, т. е. имел минимальный диаметр и малую мас-

су, и одновременно обладал бы достаточной прочностью на разрыв и обеспечивал необходимый объем передачи энергии и информации [276, с. 39]. Кабель ПТМР должен обладать рядом механических свойств, например, гибкостью, определяемой по минимальному (критическому) радиусу кривизны, до которого можно изогнуть кабель без механических повреждений. Кабели, у которых нагрузка достигает примерно 1/3 их разрывной прочности, должны допускать изгиб на радиусе, равном 19–24-кратному значению наружного диаметра. Кабель должен обладать стойкостью к перегибам, т. е. выдерживать несколько тысяч циклов перегибов на радиусе барабана кабельной лебедки.

Наряду с использованием традиционных материалов для силовых элементов, проводников, изоляции КТ в настоящее время появились новые материалы, ранее не используемые при производстве кабельной продукции, например, оптоволокно, кевлар и др., использование которых открывает новые возможности для производства новых, более совершенных КТ.

Всё более широкое использование находит волоконная оптика в военном деле и военно-морской технике [276], что объясняется долговечностью, высоким качеством каналов и достоверностью передачи информации, возможностью организации связи в относительно короткое время при незначительных затратах сил и средств. Характеристика коаксиальных и волоконно-оптических подводных кабельных систем приведена в таблице 1.34 [276, с. 68].

Опыт работы с подводными кабелями ведущих зарубежных фирм показал, что наибольшая часть разрушений кабелей является следствием таких причин: механическое разрушение, скручивание с образованием петель, коррозия. Механическое разрушение включает любые дефекты, возникающие в кабеле во время перевозки к месту работы, наматывания на барабан с помощью лебедки и развертывания с барабана.

Таблица 1.34. Характеристика коаксиальных и волоконно-оптических кабельных систем

№	Характеристики	Коаксиальный кабель	Волоконно-оптический кабель
1.	Диаметр кабеля, см	3,2	1,6
2.	Масса кабеля, кг/км	1250	625
3.	Полная масса кабеля, кг	$6 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$
4.	Полный объём кабеля, $м^3$	4021	1005
5.	Количество подводных усилителей (ПУ), шт.	150	50
6.	Количество каналов	300	600
7.	Полная стоимость кабеля, млн долл. США	44	30
8.	Стоимость каждого ПУ, тыс. долл. США	60	10

При работах на глубинах более 2000 м передача электроэнергии с обеспечивающего судна становится все более затруднительной в связи с возрастанием электрического сопротивления кабеля [160].

Анализ характеристик КТ для ППС или ПБС и их конструкций показывает, что наряду с общими требованиями, такими как: малый диаметр, масса, прочность при изгибе и т. п. — в зависимости от места кабеля в системе основными становятся те или иные критерии (параметры). Однако их учёт является довольно сложным и громоздким. Необходимо отметить, что создание классификации КТ потребовало учёта огромного количества параметров, иногда противоречащих друг другу.

На основе вышеизложенного автор предлагает следующую классификацию КТ для МПС (ППС и ПБС), используемых для подводных исследований [396]. Созданная классификация КТ позволит лучше ориентироваться в многообразии уже существующих и разрабатываемых КТ, послужит основой для создания информационной базы данных для автоматизированного проектирования КТ, даст возможность конструктору-проектанту более рационально осуществлять выбор (подбор) существующих КТ при проектировании ППС и ПБС либо создавать новые за счёт изменения или введения новых признаков (параметров КТ), которые позволят создавать КТ с новыми необходимыми (заданными) свойствами и параметрами.

Научная новизна создаваемой классификации КТ (см. таблицу 1.35) заключается в использовании её как информационной базы для проектанта, которая позволит более правильно и рационально осуществлять выбор существующих или создавать новые КТ с необходимыми свойствами и параметрами.

Таблица 1.35. Классификация кабель-тросов для подводных исследований

Признак	Подпризнак	Вторичный признак
1. по назначению	для передачи электроэнергии	
	для высокочастотной связи	
	для передачи информационных сигналов	
	грузонесущий	
	для буксировки и питания подводных систем	
	для питания сигнальных устройств	
	для питания сигнальных буёв	
	для питания электроустановок	
2. по виду (типу) морских систем, в которых используются	для стационарных МПС	
	для ППС	
	для ПБС	
	для ПКМС	
3. по конструктивным признакам	конструкция силового элемента	A — с центральным силовым элементом, B — с внешней встречновитой арматурой, C — с внешней плетёной арматурой.
	конструкция внешней оболочки	мягкая (полиэфирная лента), жёсткая

Продолжение таблицы 1.35

Признак	Подпризнак	Вторичный признак
	количество слоёв оболочки	1-слойная (тип С), 2-слойная (тип В), с параллельными волокнами центрального силового элемента (тип А)
	тип материала наружной шланговой оболочки	полиуретан, неопрен, поливинил, полиэтилен, хлорсульфоэтиленовый каучук
	материал силового элемента	сталь углеродистая, сталь нержавеющая, сплав никеля с кобальтом, титан, кевлар
	свойства материала силового элемента	абразивная стойкость, стойкость к раздавливанию, защищённость от рыб и морских животных, отношение прочности к массе, отношение прочности к диаметру, модуль упругости, длина при разрыве, $L_{разр.}/S_{поперечн.\ сеч.}$, усталостная прочность, коррозионная стойкость, стойкость к намагничиванию
	тип заполнителя (связующего)	полиуретановая смола, полиэтиленовая паста ($\rho_{отн.}$ = 0.85l, силиконовая паста ($\rho_{отн.}$ = 1.63l, полиэтиленовый компаунд
	конструкция секций	силовая секция, электрическая секция
	наличие грузонесущего элемента	трос, арамидные нити
4. по техническим характеристикам	наружный диаметр кабеля, мм	номинальное сечение
	длина, м	
	строительная длина, м	240±20; 350±30; 500±50; 750±40
	стандартная длина кабеля, м	
	расчётная масса (погонная масса, кг/м)	
	радиус изгиба, м	
	масса кабеля на воздухе, кг/м	
	масса кабеля в воде, кг/м	
	расчётная плавучесть, ±%	
	тип материала жил (проводников)	медные, алюминиевые, сталь, биметаллы: Al+Cu, оптоволокно

Продолжение таблицы 1.35

Признак	Подпризнак	Вторичный признак
	номинальное сечение жил, мм	0,5 ÷ 240 мм
	номинальное рабочее напряжение силовых жил	
	номинальное рабочее напряжение вспомогательных жил	
	электрическое сопротивление токопроводящих жил	
	электрическое сопротивление изоляции токопроводящих жил	
	электрическое сопротивление изоляции всех жил	
	рабочая частота сигнальной пары	
	волновое сопротивление сигнальной пары	
	коэффициент затухания сигнальной пары	
	стойкость к перемоткам через ролик при натяжении (число циклов)	
	герметичность в радиальном направлении	
	герметичность в продольном направлении	
	статический коэффициент безопасности	
5. по сроку службы	от 10 до 15 лет	
6. механические свойства кабеля	гибкость (минимальный радиус кривизны)	
	скручивание	
	растяжение	
	коррозия	
	механическое разрушение	
	петлеобразование	
	прочность на разрыв	
	прочность при изгибе	
	разрывное усилие, кН	
	стойкость к удару, Дж (энергия удара)	
	стойкость к вибрациям Гц (ускорение м/с^2)	
	стойкость к раздавливающим усилиям	
	допустимое усилие растяжения (Рр)	
7. климатические факторы	рабочие диапазоны температур	температура воздуха: –30...+50°С, температура воды: –4...+35°С
	устойчивость к влиянию повышенной влажности (%) при определённой температуре (напр., +40°С)	
	устойчивость к влиянию инея, льда	
	устойчивость к влиянию солнечного излучения	
8. по нагрузке на кабель	полезная нагрузка	
	нагрузка до разрушения одного элемента	
	количество циклов до разрушения	
	предельно допустимая рабочая нагрузка, кН	
	без нагрузки	
9. по степени плавучести	«0»-ой плавучести	
	«+»-ой плавучести	
	«–»-ой плавучести	
	переменной плавучести по длине	

Окончание таблицы 1.35

Признак	Подпризнак	Вторичный признак
10. по рабочей глубине	малые глубины (до 100 м)	
	средние глубины (от 100 до 600 м)	
	большие глубины (свыше 600 м)	
	сверхбольшие глубины (свыше 2000 м)	
11. влияние химических факторов	устойчивость к влиянию повышенной концентрации озона	
	устойчивость к влиянию минеральных масел	
	устойчивость к влиянию нефти	
	устойчивость к влиянию других химических веществ	
	соляной туман	
12. электрические характеристики	электрические свойства кабеля	сопротивление постоянному току в проводящих жилах, ёмкость на низких частотах, сопротивление изоляции после электризации, напряжение (постоянное и переменное), характеристический импеданс, сопротивление связи, ослабление сигнала
	направление передачи информации	С-П, П-С, С-П и П-С, П-А, П-А и А-П, А-П, С-А
	в зависимости от нормативного режима информативности	аналоговый тип линии связи, цифровой код
	по количеству линий передачи информации	1-линейная, 2-линейная, многолинейная

Принятые сокращения в таблице:

С ─ судно;
П — промежуточное устройство;
А — подводный аппарат.

Выводы по 1 разделу

Необходимо отметить, что появление ГС в жизни человека является открытием не меньшим, чем изобретение колеса. Без использования ГС жизнь человека была бы практически невозможной, не говоря уже о том, что невозможно были бы существование отдельных видов деятельности и появление новых отраслей хозяйства.

Изучая процесс использования человеком ГС, изготовленных из растительных волокон, можно сделать следующий вывод: в настоящее время ГС (тросы, канаты, лини и т.п.), используемые в морском деле и на флоте, а также в других сферах деятельности человека (нитки, верёвки, шнуры и т.п.) не потеряли своего значения и продолжают использоваться очень широко. ГС из растительных волокон находят применение как в развитых странах, так и в развивающихся (сельское хозяйство, рыбный промысел, домашние хозяйства), имеющих сырьё для производства ГС из растительных волокон, и которые не могут себе позволить использование современных искусственных материалов и стали для изготовления канатов. Иногда мы можем видеть их использование в качестве декоративных изделий.

Развитие техники морского флота и морехозяйственного комплекса в целом потребовало передачи гораздо бóльших усилий и нагрузок, чем это могли обеспечить ГС из растительных волокон, что привело к использованию других более прочных и прогрессивных материалов (проволоки для изготовления стальных и комбинированных канатов), искусственных материалов для изготовления кабель-тросов (полиэтилена, найлона, резины, пластических масс, композиционных материалов — кевлара, световолокна и т.п.). Появление новых искусственных материалов и композиционных материалов открыло новую эру в использовании ГС.

В настоящее время ГС (тросы, канаты и т.п. из искусственных волокон и стали), используемые в морском деле и на флоте, а также в других сферах деятельности человека, не потеряли своего значения и, очевидно, будут использоваться ещё довольно долго, т.к. обеспечивают передачу гораздо бóльших усилий и нагрузок, несмотря на появление новых искусственных и композитных материалов. Однако, появление искусственных материалов для изготовления канатов и тросов, кабель-тросов (полиэтилена, найлона, резины, пластических масс, композиционных материалов — кевлара, световолокна и т.п.) позволило получить ГС с новыми свойствами.

Можно сделать следующий вывод: ВИиС находят всё более широкое применение, заменяя ГС из растительных волокон и стальные, благодаря своим уникальным свойствам (особенно малому удельному весу и прочности), которым не могут уже удовлетворять вышеназванные ГС.

Кроме всего прочего, расширение применения ГС в различных видах деятельности человека, дальнейшее освоение космического пространства и глубин Мирового океана, очевидно, приведёт к появлению новых, более прочных искусственных материалов, которые послужат основой для появления ГС с новыми, ранее неизвестными свойствами.

2

МОРСКИЕ ПРИВЯЗНЫЕ СИСТЕМЫ

В настоящее время развитие морской техники требует создания принципиально новых конструкций. Расширяются диапазоны допускаемых режимов их использования — скоростей движения, рабочих глубин использования подводных аппаратов, ППС и ПБС, и условий воздействия внешней среды (степени волнения моря, скорости течения, уклонов дна, прозрачности морской воды и т.п.), необходимость действовать одновременно как в воздушной, так и в водной среде. Кроме того, необходимо учитывать происходящее изменение климата. Анализ проектных задач при создании МПС, например, ППС и ПБС, показывает, что значительную теоретическую сложность и наукоёмкость приобретают расчёты гибких связей МПС, прочность и надёжность их элементов.

Возникновение новых задач в освоении Мирового океана, морей и внутренних водоёмов, совершенствование и развитие МПС дало толчок развитию существующих и появлению новых отраслей науки и техники, конструкционных материалов и приборов, внедрению инноваций и новых технологий. В связи с этим будет развиваться, расширяться и совершенствоваться классификация МПС.

2.1. Классификация и состав морских привязных систем (МПС)

Одним из важнейших вопросов в исследовании любых систем и технических устройств является вопрос их классификации, что позволяет ориентироваться в их многообразии и является источником знаний о них.

В Словаре иностранных слов [207, с. 235] даётся следующее определение: классификация — система соподчинённых понятий (классов, объектов, явлений) в какой-либо отрасли знания, составленная на основе учёта общих признаков объектов и закономерных связей между ними; классификация позволяет ориентироваться в многообразии объектов и является источником знаний о них.

Множество систем, существующих в мире, можно классифицировать в зависимости от ряда признаков. Классификация — научный метод, заключающийся в дифференциации всего множества объектов, и последующее их объединение в определенные группы на основе какого-либо признака.

При общем подходе к классификации систем выделяются следующие признаки [184]:

- по происхождению;
- по объективности существования;
- по взаимодействию с окружающей средой;
- по действию во времени;
- по обусловленности действия;
- по степени сложности.

Широкое распространение в технике получили привязные системы (ПС). Их можно разделить на космические, наземные, воздушные и морские (рис. 2.1) [372, 384].

Среди разнообразной океанской техники особое место занимают МПС. В МПС включают, как правило, привязные подводные системы (ППС) и подводные буксируемые системы (ПБС). По отдельным классификационным признакам ППС и ПБС классифицировали: Егоров В.И., Блинцов В.С., Магула В.Э., Дмитриев А.Н., Иконников И.Б., Гаврилов В.М., Пузырев Г.В., Лобанов В.А., Лукошков А.В., Виноградов Н.И., Гутман М.Л., Лев И.Г., Нисневич М.З., Ястребов В.С., Кенни Дж.Е., Милн П., Хаукс Герхард и др. Автор, однако, не обнаружил классификации МПС.

Рассмотрим МПС. К МПС относят ППС и ПБС. Среди разнообразной океанской техники особое место занимают ППС, позволяют на любой глубине выполнять различные исследования и работы без участия человека. Использование систем (комплексов), имеющих в своём составе ГС, привязные и буксируемые аппараты, позволило дополнить глубоководные аппараты (обитаемые и необитаемые) в океанографических исследованиях и подводных работах [142]. Необходимо отметить, что полной классификации МПС как таковой не существует. Автор, используя опыт предыдущих исследователей, а также учитывая новые задачи и схемы, предлагает свою классификацию МПС.

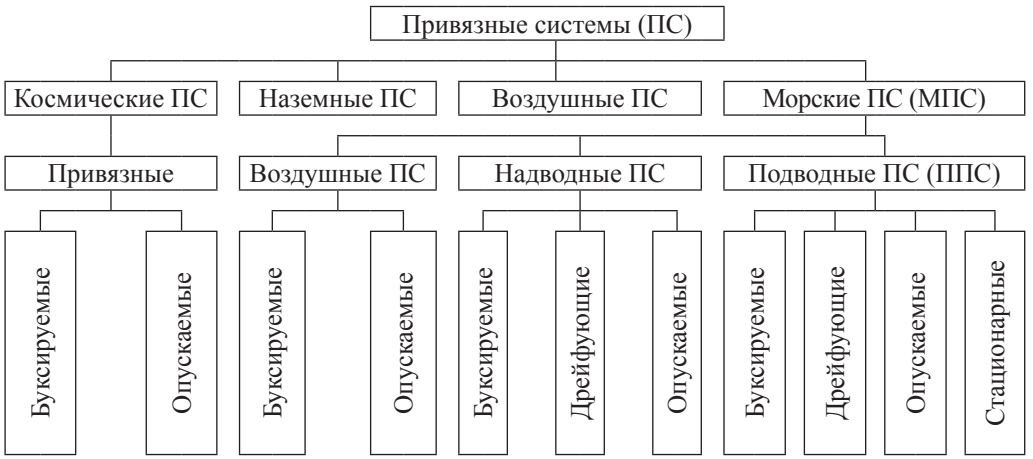


Рис. 2.1. Схема классификации привязных систем

В состав МПС включают несколько отдельных модулей (звеньев) и соединяющих их ГС, которые обеспечивают в рабочем состоянии ПС необходимую пространственную конфигурацию. В качестве ГС могут применяться стальные и синтетические канаты, грузонесущие кабели, кабель-тросы, цепи и другие ГС, способные передавать не только механические усилия, но и обеспечивать при необходимости энергетическую и информационную связь между модулями ПС, ПС и носителем (судном, подводной лодкой, воздушным средством и т. п.). В качестве модулей, например, ППС, могут служить носители подводной аппаратуры, углубляющие, отводящие и самоходные аппараты, буи и другие подобные устройства.

Несмотря на функциональное и конструктивное разнообразие современных ППС, их создатели сталкиваются с рядом сходных проблем и нуждаются в разработке общих подходов к их разрешению [157, с. 13]. К таким проблемам относятся проблемы гидродинамики. При создании движущихся под водой ПС и аппаратов изучение вопросов их динамики, силового воздействия среды и судна-носителя, управления и стабильности движения являются первостепенными и во многом определяют возможность их нормального функционирования. При этом наиболее существенной особенностью динамики ППС, усложняющей ее по сравнению с известной теорией движения в жидкости и газе автономных твердых тел (самолетов, подводных и надводных судов и т. п.), является необходимость учета влияния ГС как системы с распределенными параметрами, также взаимодействующей с потоком жидкости [145].

Одним из важнейших средств проникновения в морские глубины являются привязные подводные аппараты (ПА), находящие в последнее время все более широкое применение. Привязными подводными аппаратами принято называть подводные технические средства, имеющие механическую гибкую связь с судном или другой плавучей платформой, которые обеспечивают доставку подводного аппарата в район использования и его обслуживание в процессе работы. Привязной ПА вместе с ГС составляет ППС [106, с. 11]. В зависимости от назначения ППС может быть обеспечено движение привязного ПА в толще воды, вблизи ее поверхности или у дна моря.

Такое многообразие ПС и в их числе МПС, появление новых задач и схем функционирования требуют пересмотра существующих отдельных видов классификации.

С помощью ППС производятся работы по поиску и обследованию затонувших образцов военной техники (самолетов, вертолетов, ракет и т.п.), спасению людей. Статические и динамические свойства различных плавучих объектов, удерживаемых на якоре и испытывающих воздействие морского волнения и подводных течений, во многом совпадают со свойствами привязных подводных систем, что позволяет применять при их изучении модели и методы, разработанные для анализа динамики привязных подводных систем. К таким объектам относятся океанологические буи [11, 144], плавучие буровые установки [56, 102, 192], вехи, якорные мины, суда на якорной стоянке и т. п.

Наличие механической связи ПА с обеспечивающим судном, с одной стороны, упрощает эксплуатацию ППС, так как снижает вероятность потери ПА и облегчает операции спуска-подъема его на судно, обслуживание и подготовку к последующему использованию.

При этом значительно увеличиваются возможные сроки непрерывной работы за счет подачи энергии с судна на привязной ПА по соединяющему их кабелю, но с другой стороны, наличие ГС является источником динамических воздействий на ПА, вызванных качкой и рысканием обеспечивающего судна или плавучей платформы, и усложняет управление движением ПА.

В развитии ППС последних десятилетий проявляются тенденции к расширению диапазонов допускаемых режимов их использования — скоростей движения, заглублений ПА и условий воздействия на них внешней среды (степени волнения моря, скорости течения, уклонов дна, прозрачности морской воды и т. п.) [109, с. 12].

В мае 2008 года был принят Указ Президента Украины №463/2008 «О решении Совета национальной безопасности и обороны Украины от 16 мая 2008 года «О мерах по обеспечению развития Украины как морского государства» от 20.05.2008 г. [1]. В соответствии с данным решением был рассмотрен комплекс проблем, связанных с развитием Украины как морского государства. Для обеспечения технических работ на шельфе важным, на наш взгляд, является принятие п. 16 (а) данного Решения [1, с. 7], в котором указывается, что для обеспечения безопасности и обороноспособности Украины в акваториях Чёрного и Азовского морей, в том числе, необходимо «...обеспечить поиск подводных объектов и быстро реагировать на аварии (катастрофы) на море».

В п. 16 (в) Решения [1, с. 7] отмечается, что необходимо в двухмесячный срок утвердить комплекс мер по созданию Единой национальной автоматизированной системы выявления надводной и подводной обстановки вдоль морского побережья Украины, предусмотрев введение в эксплуатацию в 2008–2012 годах соответствующего национального орбитального комплекса. А в п. 16 (е) Решения [1, с. 8] — создание стационарных и мобильных систем выявления несанкционированных подводных объектов в границах портовых вод и в районах расположения отечественного нефтегазового комплекса на континентальном шельфе.

В данном Решении планировалось уделить внимание развитию подводных средств поиска и технике обеспечения выполнения подводных работ на континентальном шельфе, что открывает новые возможности для развития нового направления в судостроительной отрасли Украины — проектированию и созданию подводных аппаратов, ППС и ПБС, других средств освоения ресурсов морей и океанов.

Необходимо отметить, что классификации ППС, включающих в свой состав и буксируемые ПА, как таковой не существует. В различных источниках есть попытки классифицировать ППС по отдельным классификационным признакам [14, 29, 41, 63, 145, 156, 159, 160]. Классификации МПС автор вообще не обнаружил.

В. С. Блинцов и В. Э. Магула используют следующие классификационные признаки: по способу перемещаться под водой; по назначению; по виду носителя; по присутствию человека под водой; по энергообеспечению; по составу подводной части; по рабочей глубине погружения; по массе подводных аппаратов [122].

Предлагаем классификацию МПС осуществлять и по следующим признакам [407]:

1) по назначению:
   – поисковые (обнаружение, обследование и идентификация подводных объектов);
   – исследовательские (ПА, стационарные научно-исследовательские станции, привязные буи, в т. ч. всплывающие и погружающиеся самостоятельно согласно программе; зонды, самописцы течений, батометры, термобатиграфы, датчики магнитометров, метеорологические буи и т. п.);
   – производственные (предназначенные для подводных работ, подводные плавучие хранилища нефти, подводные агрегаты для сбора минералов, конвейерная линия между судном и поверхностью морского дна как часть комплекса по передаче добытых минералов, промежуточные подъёмные станции);
   – экспериментальные, предназначенные для отработки отдельных видов оборудования;
   – специализированные (для выполнения специальных целей, например, военных; охраны портов и подводных объектов, спасательных работ; туристские ПА, инспекции и осмотров, ремонта подводного оборудования);
2) по способу стационарности:
   – стационарные (плавучие подводные причалы и платформы, в т.ч. для добычи углеводородов);
   – нестационарные;
3) по массе и габаритным размерам:
   – малые (до 1000 кг);
   – средние (до 5000 кг);
   – крупные (до 10000 кг);
   – сверхкрупные (свыше 10000 кг);
4) по обитаемости:
   – обитаемые, с человеком на борту;
   – необитаемые — управляемые дистанционно;
   – работающие по заданной программе (роботы);
5) по конструктивным особенностям:
   – буксируемые (батипланы, рыболовные тралы и т.п.);
   – опускаемые (гидростаты);
   – буи нейтральной плавучести (БНП);
6) по типу гибкой связи:
   – грузонесущий трос (якорные или швартовные комплексы);
   – кабель-трос (гидростаты, буксируемые системы);
   – кабель;
   – буксирно-кабельная часть (буксируемые);
7) по способу удержания на глубине:
   – привязные, поддерживаемые на кабель-тросе (гидростаты);
   – буксируемые (батипланы);

– донные (передвигающиеся по дну с помощью механических органов сцепления с грунтом);
– привязные, удерживаемые якорным или швартовным устройством (например, устройства для передачи нефти или газа на танкеры, якорные мины и т. п.);

8) по способу вплытия:
– привязные, небуксируемые, поднимаемые на грузонесущем или кабель-тросе (например, БНП, всплывающие по заданной программе);
– буксируемые, поднимаемые на кабель-тросе;
– гидродинамические, поднимаемые тягой движителей.

9) по способу доставки к месту назначения:
– транспортируемые на борту судна-носителя;
– транспортируемые на борту подводного носителя;
– транспортируемые своим ходом (методом буксировки);
– транспортируемые авиационным способом (например, донные и якорные мины);
– транспортируемые автомобильным транспортом и используемые с берега;
– автономные (имеющие двигатель или переносные).

10) по способу управления:
– управляемые человеком, находящимся на борту;
– управляемые дистанционно (ТПА);
– работающие по заданной программе (роботы).

11) по глубине удержания:
– для малых глубин — до 600 м;
– для средних глубин — до 2000 м;
– для больших глубин — до 6000 м;
– для предельных глубин — до 12 000 м.

Схема классификации МПС приведена на рис. 2.2.

Рис. 2.2. Классификация МПС

2.2. Техническое обеспечение глубоководных исследований с помощью МПС с гибкими связями

Многообразие задач освоения шельфа и океана рождает широкую гамму необходимых для этого стационарных и плавучих технических средств. В значительной степени их конструктивные особенности, как отмечает В.П. Шостак [102], типоразмеры и применяемое оборудование обусловлены стратегией и тактикой, выработанными опытом решения этих задач. В классификации технических средств освоения океана выделены наиболее характерные признаки — типоразмеры, способы плавания, применяемые технологии. При этом группы объектов, выполняя различные функции, объединяются решением одной стратегической задачи на уровне государственных или международных комплексных программ. Такой принцип положен в основу их классификации, предложенной В.П. Шостаком [102, с. 24], исходя из необходимости цельного представления о технической оснащённости процессов изучения и освоения океана (см. табл. 2.1). При этом из целевых типов судов могут быть составлены многоцелевые, комбинированные суда и плавучие технические средства, например: судно-носитель комплексных привязных ПА с навесным оборудованием (СНКПА) будет включать в себя судно-носитель обитаемых или необитаемых ПА (СНПА), обитаемый привязной рабочий ПА (ОПРПА), необитаемый привязной исследовательский ПА (НПИПА), необитаемый привязной рабочий ПА (НПРПА) и необитаемый привязной спасательный ПА (НПСПА).

Таблица 2.1. Классификация основных технологий и средств изучения и освоения океана [102]

Основные технические средства решения научных и хозяйственных задач			
Разведка углеводородов	Добыча углеводородов	Разведка и добыча твёрдых минералов	Научные исследования
Перечень решаемых технологических задач			
Разведочное бурение с целью обнаружения нефтегазоносных пластов. Оконтуривание месторождения, определение запасов сырья. Опробование скважин и установление пластового давления, дебита и состава сырья	Бурение промысловых скважин. Подъём сырья на поверхность, его сепарация с выделением нефти, конденсата и газа. Подготовка сырья к хранению и транспортировке — обезвоживание и дегазация нефти, осушка газа. Очистка освобождённой воды от нефтеостатков, закачка газа и воды в пласт для повышения пластового давления, сбор шлама, транспортирование сырья к хранилищам	Фотосъемка и видеозапись поверхности дна. Взятие проб россыпей минералов. Определение характеристик и состава сырья, плотности залегания, оконтуривание месторождения. Сбор минералов с поверхности дна и его подъём на борт базового судна. Перегрузка обогащенного сырья на транспортные средства	Измерение физических и химических параметров атмосферы, толщи воды, рельефа и разрезов морского дня по глубине. Изучение физических процессов, происходящих в океане, изучение фауны и флоры и условий их жизнедеятельности, динамики развития организмов и растений, установление границ промыслов, составление океанографических карт

Окончание таблицы 2.1

Основные технические средства решения научных и хозяйственных задач			
Разведка углеводородов	Добыча углеводородов	Разведка и добыча твёрдых минералов	Научные исследования
Перечень плавучих и стационарных технических средств, реализующих хозяйственные и научные технологии			
– буровые суда (БС); – самоподъёмные, буровые установки (СПБУ); – полупогружённые буровые установки (ППБУ); – плавучие буровые установки с погружаемым балластным понтоном	– полупогружные буровые добычные установки; – стационарные буровые добычные установки на ферменных металлических опорных основаниях; – стационарные буровые добычные установки на железобетонных опорных основаниях гравитационного типа; – притапливаемые установки на гибких натяжных опорах; – намывные острова; – ледостойкие сооружения со свайным или гравитационным закреплением на грунте; – плавучие заводы для переработки сырья (сжижения газа); – плавучие хранилища нефти	– комплекс: 1) базовое судно с гидравлическим способом подъема, 2) подводный агрегат сбора минералов; – комплекс: 1) базовое судно с канатно-черпаковым способом подъема; 2) конвейерная линия между судном и поверхностью морского дна; – комплекс: 1) базовое судно со спуско-подъемным устройством для работы с агрегатами сбора и плавучими контейнерами; 2) агрегат сбора и плавучие контейнеры; – комплекс: 1) базовое судно; 2) промежуточная подъемная станция; 3) агрегаты сбора минералов	– научно-исследовательские суда, специализированные или универсальные с опускной и буксируемой аппаратурой; – научно-исследовательские подводные аппараты, самоходные и несамоходные буксируемые и необитаемые автономные и привязные; – суда глубоководного исследовательского бурения; – суда для разведки поверхности дна; – суда для инженерно-геологических изысканий; – дрейфующие заякоренные буи и стационарные станции
Применяемое технологическое оборудование			
– подводно-устьевое оборудование для герметизации устья скважины на дне моря; – оборудование опробования; – каротажное оборудование; – обсадные, буровые трубы и другой инструмент; – буровой комплекс для разведочного бурения	– комплекс бурового оборудования, обеспечивающего бурение куста эксплуатационных скважин; – насосы, компрессоры, манифольды, нагреватели, испарители, дегазаторы, сепараторы, гликолевые колонны	– привода механизмов конвейерной канатно-черпаковой линии; – насосы и компрессоры для подъема пульпы; – вышка со спуско-подъемным оборудованием для монтажа-демонтажа трубного става; – секции трубного става; – вибросита для разделения пульпы на фракции; – спуско-подъемные устройства для работ с аппаратами-сборщиками; – транспортеры или грейферные краны для передачи сыпучих грузов на транспортные суда	– спуско-подъёмные устройства для работы с забортной аппаратурой; – кабель-тросовые лебедки с токосъемом; – буксируемые, привязные и автономные подводные аппараты; – забортные исследовательские приборы (зонды, самописцы течений, батометры, термоботиграфы, датчики магнитометров, метеорологические буи, аэрорадиозонды); – оборудование для исследования проб и обработки результатов измерений

Представленная номенклатура целевых типов судов и плавучих технических средств разработана в соответствии с задачами, стоящими перед нефтегазовой отраслью РФ до 2010 г. по созданию плавучих средств для освоения морских месторождений шельфа арктических морей [294]. Классификация вспомогательных технологий и технических средств изучения и освоения океана приведена в таблице 2.2 [102, с. 26].

Таблица 2.2. Классификация вспомогательных технологий и технических средств изучения и освоения океана [102]

Вспомогательные технические средства, обеспечивающие изучение и освоение океана
Строительно-монтажные работы, инспекции, транспорт, снабжение, аварийно-спасательные работы
Перечень решаемых технологических задач
– установка опорных оснований; – монтаж конструкций верхнего строения стационарных платформ; – монтаж функциональных блоков стационарных платформ; – прокладка трубопроводов и установка донно-забортной арматуры; – демонтажные работы по ликвидации месторождений; – доставка в район добычи конструкций, оборудования, снабженческих грузов; – транспортировка из районов добычи добытого сырья (нефти, газа, твердых минералов); – инспекции и ремонт подводного оборудования, водолазные работы; – ликвидация последствий аварий, борьба с пожарами, борьба за живучесть
Перечень технических средств
– плавучие краны; – буксиры рейдовые, буксиры-спасатели, буксир-кантовщик; – специальные водолазные суда; – суда-трубоукладчики; – подводные аппараты для осмотров, инспекций и ремонтных работ; – суда-навалочники; – танкеры, танкеры-продуктовозы; – газовозы; – специальные суда-площадки для перевозки габаритных грузов (конструкций опорных оснований, функциональных блоков и др.); – пожарные суда; – ледоколы; – вертолеты; – нефтесборщики

2.3. Подводные привязные (ППС) и буксируемые системы (ПБС)

До окончания Второй мировой войны в морском деле использовалось ограниченное число технических средств, которые можно было бы отнести к ППС [98]. Это прежде всего рыболовные тралы [116, 128], устройства для борьбы с морскими минами [149]. Послевоенное развитие мировой морской техники продемонстрировало появление многих новых направлений в создании подобных средств.

Современные ППС решают широкий круг задач в океанологии (исследование физико-химических параметров воды) [11, 30, 63, 98, 100, 105, 145, 176, 272], геологии (поиск полезных ископаемых, определение их свойств, исследование геологических аномалий) [41, 56, 63, 162], при обеспечении работ на подводных нефтегазопромыслах и нефтегазопроводах, проложенных на дне морей (обследование состояния труб, диагностика и поиск повреждений, ремонт и т. п.) [124, 192], в области рыболовства и рыбоводства [84, 189].

На базе ППС созданы новые образцы военно-морской техники — это буксируемые и опускаемые гидроакустичсекие станции (ОГАС) для поиска подводных лодок под слоем температурного скачка, а также различного рода тралы, искатели и опускаемые самоходные подводные аппараты для борьбы с минной опасностью в море. С помощью ППС производятся работы по поиску и обследованию затонувших образцов военной и гражданской техники (самолётов, вертолётов, ракет, судов и кораблей и т.п.), спасению людей на море.

В [145, с. 3] авторы отмечают, что для длительных пространственно-временных измерений наиболее приспособлены подводные буксируемые системы (ПБС) — класс неавтономных ПА — и подводные буи нейтральной плавучести (БНП) — класс автономных несамоходных (дрейфующих) ПА. Каждый вид технических средств имеет свои особенности и преимущества. ПБС и БНП считают одними из наиболее рациональных комплексов технических средств для изучения океана. Отличительной особенностью подводных буксируемых систем является наличие гибкой связи в виде троса или грузонесущего кабеля между буксировщиком и самим аппаратом.

Как отмечает профессор И. Б. Иконников в [145], целесообразность применения и высокая эффективность буксируемых подводных систем (ПБС) подтверждаются опытом успешных подъемов различных затонувших объектов, обнаруженных с помощью магнитометрической, телевизионной и прочей буксируемой аппаратуры. Благодаря использованию этих средств получен значительный объем информации о гидрофизических полях океана. Буксируемые аппараты в равной степени пригодны для поиска и разведки полезных ископаемых.

ППС по происхождению можно отнести к искусственным; по объективности существования — к материальным; по взаимодействию с окружающей средой — к открытым; по действию во времени — к динамическим; по обусловленности действия — к детерминированным; по воздействию окружающей среды — к вероятностным; по степени сложности — к сложным и особо сложным.

Поскольку нас будут интересовать ППС, имеющие в своём составе гибкие элементы (трос или кабель-трос), изучив соответствующую литературу и обобщив существующий опыт, автор считает целесообразным представить следующую классификацию ППС и ПБС.

Предлагаем классификацию ППС осуществлять и по следующим признакам [386]:

1) по назначению:

– поисковые (обнаружение, обследование и идентификация подводных объектов);

– исследовательские (ПА, стационарные научно-исследовательские станции, привязные буи, в т. ч. всплывающие и погружающиеся самостоятельно согласно программе; зонды, самописцы течений, батометры, термобатиграфы, датчики магнитометров, метеорологические буи и т.п.);

– производственные (предназначенные для подводных работ, подводные плавучие хранилища нефти, подводные агрегаты для сбора минералов, конвейерная линия между судном и поверхностью морского дна как часть комплекса по передаче добытых минералов, промежуточные подъёмные станции);

– экспериментальные, предназначенные для отработки отдельных видов оборудования;

– специализированные (для выполнения специальных целей, например, военных; охраны портов и подводных объектов, спасательных работ; туристские ПА, инспекции и осмотров, ремонта подводного оборудования);

2) по способу стационарности:

– стационарные (плавучие подводные причалы и платформы);

– нестационарные;

3) по массе и габаритным размерам:

– малые (до 1000 кг);

– средние (до 5000 кг);

– крупные (до 10000 кг);

– сверхкрупные (свыше 10000 кг);

4) по обитаемости:

– обитаемые, с человеком на борту;

– необитаемые — управляемые дистанционно;

– работающие по заданной программе;

5) по конструктивным особенностям:

– буксируемые (батипланы, рыболовные тралы и т.п.);

– опускаемые (гидростаты);

– буи нейтральной плавучести (БНП);

6) по типу гибкой связи:

– грузонесущий трос (якорные или швартовные комплексы);

– кабель-трос (гидростаты);

– буксирно-кабельная часть;

7) по способу удержания на глубине:

– привязные, поддерживаемые на кабель-тросе (гидростаты);

– буксируемые (батипланы);

– донные (передвигающиеся по дну с помощью механических органов сцепления с грунтом);

– привязные, удерживаемые якорным или швартовным устройством (например, устройства для передачи нефти или газа на танкеры, якорные мины и т.п.);

8) по способу вплытия:

– привязные, небуксируемые, поднимаемые на грузонесущем или кабель-тросе (например, БНП, всплывающие по заданной программе);

– буксируемые, поднимаемые на кабель-тросе;

– гидродинамические, поднимаемые тягой движителей;

9) по способу доставки к месту назначения:

– транспортируемые на борту судна-носителя;

– транспортируемые на борту подводного носителя;

– транспортируемые авиационным способом (например, донные и якорные мины);

– транспортируемые автомобильным транспортом и используемые с берега;

– автономные (переносные);

10) по способу управления:

– управляемые человеком, находящимся на борту;

– управляемые дистанционно (ТПА);

– работающие по заданной программе;

11) по глубине удержания:

– для малых глубин — до 600 м;

– для средних глубин — до 2000 м;

– для больших глубин — до 6000 м;

– для предельных глубин — до 12 000 м.

Классификация ПБС рассмотрена в [145, 176]. Так, В.И. Егоров [176, с. 5] предлагает классифицировать ПБС в зависимости от задач, возлагаемых на системы подводного поиска (СПП), и типа поисковой аппаратуры на удерживающие своё углубление от поверхности и буксируемые системы придонного типа.

Рассмотрим классификацию ПБС, как составляющую МПС [386].

Подводные буксируемые системы (ПБС) предлагаем классифицировать по следующим признакам:

1) по назначению:

– исследовательские ПА (многоцелевые);

– производственные (предназначенные для подводных работ);

– грузопассажирские (предназначенные для транспортировки грузов и легководолазов, туристские);

– экспериментальные, предназначенные для отработки отдельных видов оборудования;

– специализированные (для выполнения специальных целей, например, военных, охраны портов и подводных объектов, спасательных работ);

2) по конструктивным особенностям:

– однозвенные;

– двухзвенные;

– многозвенные;

3) по типоразмерам и массо-габаритным показателям:

– малые (до 100 кг);

– средние (до 500–1000 кг);

– крупные (до 2500 кг);

– сверхкрупные (свыше 2500 кг);

4) по типу гибкой связи:

– грузонесущий трос;

– кабель;
– буксирно-кабельная часть;
– кабель-трос;
5) по способу буксировки:
– буксируемые по поверхности воды (надводными судами и ПЛ из-под воды);
– буксируемые под водой (в том числе и по дну);
6) по способу удержания на глубине:
– привязные, поддерживаемые на кабель-тросе (гидростаты);
– буксируемые (батипланы);
7) по количеству буксируемых элементов:
– с одним поисковым элементом;
– с несколькими поисковыми элементами (2 и более);
8) по составу оборудования:
– стандартное;
– специальное;
9) по виду буксировщиков:
– буксируемые судами (в т.ч. судами на воздушной подушке и подводных крыльях);
– буксируемые подводной лодкой (ПЛ);
– буксируемые авиационным способом (самолётами и вертолётами);
10) по количеству судов-буксировщиков:
– одним судном (одинарные);
– двумя судами (парные).
11) по способу доставки к месту назначения:
– транспортируемые на борту судна-носителя;
– транспортируемые на борту подводного носителя;
– транспортируемые авиационным способом (например, самолётом или вертолётом);
– автономные, базирующиеся на берегу;
12) по способу вплытия:
– буксируемые, поднимаемые на грузонесущем тросе;
– буксируемые, поднимаемые на кабель-тросе;
– гидродинамические, поднимаемые тягой движителей;
13) по глубине буксировки:
– для малых глубин — до 600 м;
– для средних глубин — до 2000 м;
– для больших глубин — до 6000 м;
– для предельных глубин — до 12 000 м;
14) по скорости буксировки:
– малая скорость — до 6–10 уз.;
– средняя скорость — до 11–20 уз.;
– большая скорость — свыше 20 уз.

Схема классификации ПБС приведена на рисунке 2.3 [372].

Рис. 2.3. Классификация ПБС [386]

Как видим, классификация ППС и ПБС с выделением даже наиболее характерных признаков — типоразмеров, способа погружения, применяемых технологий — затруднена. При этом группы признаков, выполняя различные функции, иногда объединяются решением одной задачи. Такой принцип и положен в основу их классификации, исходя из необходимости цельного представления о системе.

Скорость и глубина хода являются важнейшими эксплуатационными характеристиками БС. Величина указанных параметров определяется возможностями судовых устройств: лебедки — в части размещения кабель-буксира требуемого диаметра и строительной длины с необходимым типом обтекателя; энергетической установки — в части обеспечения необходимой скорости; прочностными характеристиками кабель-буксира, которые зависят от его диаметра, и др. [137].

На наибольшую скорость буксировки, как правило, влияют прочностные характеристики БС, то есть натяжение ГС с учетом динамических составляющих от возмущений качки буксировщика не должно превышать допустимой величины. Наиболее эффективный путь повышения скорости буксировки заключается в снижении гидродинамического сопротивления БС. От наибольшей скорости буксировки зависят параметры заглубляющих устройств, создающих нагрузки, способные удерживать БС в подводном положении, а также ходовые параметры БН, который должен быть устойчивым во всем принятом диапазоне скоростей буксировки вплоть до предельной. Скорость буксировки неразрывно связана с глубиной хода аппаратуры. Как правило, глубоководные системы сравнительно тихоходные, а достижение предельных глубин погружения аппаратуры возможно на минимальной скорости. Поэтому судно должно эффективно управляться при минимальной скорости буксировки.

В настоящее время среди современных технических средств исследования и освоения океана всё большее значение приобретают необитаемые подводные аппараты. С их помощью можно, в частности, производить [176]:

– измерение различных океанографических и геофизических величин;
– осмотр и фотографирование морского дна;
– взятие проб грунтов;
– обслуживание и ремонт стационарных подводных промышленных установок.

Существует множество определений подводных аппаратов (ПА). Их классификация подробно рассмотрена в литературе [29, 41, 63, 110, 156, 159, 162, 194] и представляет интерес, так как очень часто ПА являются частью ППС и ПБС. На рис. 2.4 представлена классификация ПА [194, с. 102].

Различают опускаемые ППА, предназначенные для эксплуатации в режиме спуска, подъёма и удержания на определённой глубине, и буксируемые ППА, предназначенные для эксплуатации в режиме буксировки [159]. В состав ППС могут входить несколько отдельных модулей (звеньев) и соединяющих их гибикх связей, которые обеспечивают в рабочем состоянии ППС необходимую пространственную конфигурацию. В качестве ГС применяют стальные и синтетические канаты, грузонесущие кабели, цепи и другие гибкие элементы, способные передавать не только механические усилия, но и при необходимости обеспечивать энергетическую и информационную связь между ПА и судном-носителем.

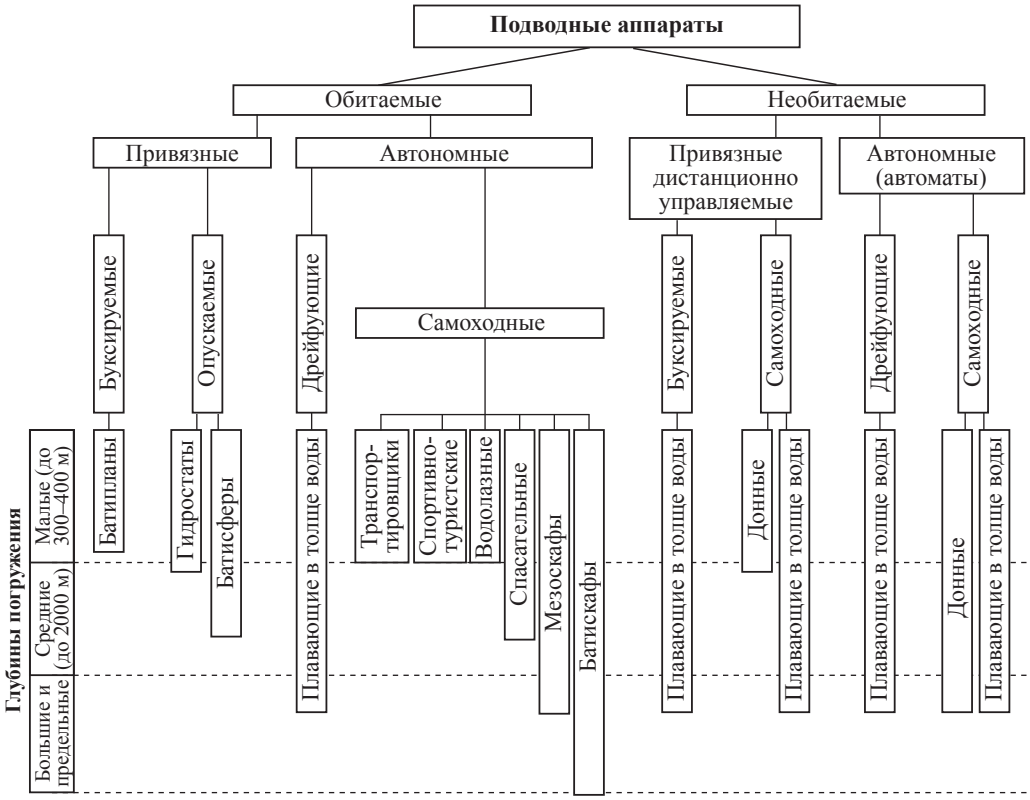


Рис. 2.4. Классификация подводных аппаратов [194, с. 102]

Базируясь на существующих системах классификации ПА, мы предлагаем следующую систему классификации ПА [386]:

1) по назначению:

– исследовательские подводные аппараты, как правило, многоцелевые;

– производственные, предназначенные для подводных работ, главным образом специализированные;

– грузопассажирские, предназначенные для транспортировки грузов и легководолазов, спасательных работ и туристских прогулок;

– экспериментальные, предназначенные для отработки отдельных видов оборудования;

2) по способу доставки к месту погружения:

– буксируемые;

– транспортируемые на борту судна-базы;

– автономные, базирующиеся на берегу;

3) по способу удержания на глубине:

– привязные, поддерживаемые на кабель-тросе (гидростаты);

– поплавковые, имеющие легковесный поплавок (батискафы);

– беспоплавковые, поддерживаемые плавучестью прочного корпуса;

– гидродинамические, использующие тягу движителей для удержания на глубине;

– донные, передвигающиеся с помощью механических органов сцепления с грунтом;

4) по способу всплытия:

– привязные, поднимаемые на кабель-тросе;

– балластированные, имеющие сбрасываемый твердый балласт;

– гидродинамические, поднимаемые тягой движителей;

5) по способу управления:

– обитаемые, с человеком на борту;

– необитаемые, управляемые дистанционно (ДУПА) или работающие по заданной автопрограмме (роботы);

6) по глубине погружения:

– для малых глубин — до 600 м;

– для средних глубин — до 2000 м;

– для больших глубин — до 6000 м;

– для предельных глубин — до 12 000 м.

2.4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований МПС

Анализ проектных задач при создании МПС показывает, что значительную теоретическую сложность и наукоёмкость приобретают расчёты ГС МПС. В связи с увеличением рабочих глубин МПС возникает актуальность совершенствования теории и методов проектирования гибких связей ППС, требуется уточнение существующих методик. Это обусловлено тем, что существующие методы расчёта и проектирования либо являются упрощёнными и не учитывают действительные нагрузки и характер нагружения ГС ППС, или являются довольно сложными и громоздкими для конструкторов-проектантов и требуют значительных затрат времени для их выполнения.

Для кабель-тросов (КТ), применяемых в ППС, особое значение приобретает расчёт для средних (2000–4000 м) и больших глубин (6000–8000 м). В настоящее время при создании ППС существует три направления в проектировании КТ [305], обеспечивающие их хорошие массо-габаритные и эксплуатационные характеристики:

– применение для грузонесущих элементов лёгких материалов с максимальным отношением прочности к массе;

– передача информации посредством телеметрических систем по коаксиальному грузонесущему кабелю с временным и частотным уплотнением информационных сигналов;

– использование кабелей с оптическими информационными каналами.

К особенностям проектирования двухзвенных КТ относятся [316]:

– обоснование длины и удельной плотности КТ отрицательной плавучести (КТОП), обеспечивающих минимальные потери электроэнергии и погружение ходового конца КТОП на заданную глубину при известных эпюрах течений;

– обоснование длины и удельной плотности КТ нейтральной плавучести (КТНП), обеспечивающих перемещение НПА вокруг коренного конца КТОП с заданным радиусом.

В табл. 2.3 приводится порядок расчёта (обоснования) параметров КТОП и КТНП [316] для различных глубин погружения (300–400 м).

Таблица 2.3. Порядок обоснования параметров кабель-тросов

№ п/п	Порядок расчёта	
	Параметры КТОП	Параметры КТНП
1.	Задание эпюры течений F и глубины работы НПА $h_{\text{р}}$	Задание скорости течения на рабочей глубине
2.	Задание (или предварительный расчёт) потребляемой НПА мощности $P_{\text{А}}$	Задание мощности НПА
3.	Задание (или предварительный расчёт) длины $l_{\text{КТОП}}$	Задание длины КТ $l_{\text{КТНП}}$
4.	Расчёт диаметра $Д_{\text{КТОП}}$	Расчёт диаметра $Д_{\text{КТНП}}$
5.	Расчёт потерь мощности (падение напряжения) $\Delta P_{\text{КТОП}}$	Расчёт потерь мощности (напряжения) $\Delta P_{\text{КТНП}}$
6.	Сравнение потерь мощности (падения напряжения) с допустимыми $\Delta P_{\text{Д}}$. При $\Delta P_{\text{КТОП}} > \Delta P_{\text{Д}}$ вернуться в п. 4	Если $\Delta P_{\text{КТНП}} > \Delta P_{\text{Д}}$, вернуться в п. 4
7.	Расчёт пространственного положения КТ заданной длины $l_{\text{КТОП}}$ при известной эпюре течения F и диаметре $Д_{\text{КТОП}}$, определение глубины погружения ходового конца $h_{\text{Х}}$	Расчёт удаления НПА от ходового конца КТОП в случаях удаления НПА по течению, против течения и в сторону течения
8.	При $h_{\text{Х}} \neq h_{\text{р}}$ вернуться в п. 3 (осуществляя увеличение или уменьшение $l_{\text{КТОП}}$)	Если в наихудшем случае удаление НПА меньше заданного, вернуться в п. 3, где изменяется длина КТНП

При работе НПА на средних и больших глубинах в зависимости от условий использования (наличие подводных течений в месте работы НПА) может потребоваться значительное удлинение КТНП, в несколько раз превышающей рабочую глубину НПА, что ведёт к увеличению веса КТ и габаритов специальных лебёдок, удорожанию КТ и всей СППС в целом. В связи с этим возникает необходимость оптимизации параметров КТ. В [317] приведена методика оптимизации в виде блок-схемы, а также обобщённый алгоритм расчёта КТ.

Условия эксплуатации НПА накладывают жёсткие ограничения на массогабаритные показатели кабеля: кабельная линия должна иметь малое сечение и минимальное затухание электрических сигналов при заданных значениях механической и электрической прочности. С ростом рабочей глубины аппаратов под

действием гидростатического давления кабель обжимается, что вызывает частые механические повреждения отдельных жил. Это обстоятельство, а также большая длина кабеля требуют повышения его разрывной прочности, что приводит к дополнительному увеличению его диаметра и массы.

Подводные буксируемые системы. В [145] рассмотрен порядок выполнения работ при проектировании ПБС. Отмечается, что пространственная структура любой гидродинамической схемы ПБС определяется расположением гибких механических или электромеханических связей (буксирно-кабельная часть — БКЧ), обеспечивающих механическую, энергетическую и информационно-управляющую связи элементов подводной системы — взаимную и с буксировщиком. Конструктивные параметры буксиров обусловлены гидродинамической схемой ПБС, принятой в соответствии с техническим заданием на ее проектирование. В первую очередь они зависят от углубления Y, скорости буксировки v_0 и кривой тяговых усилий буксировщика $T = T(v)$. При определении этих параметров важное значение имеют также характеристики тяговых лебедок и спуско-подъемных средств СН (буксировщика) [16].

Гидродинамический расчет любой из схем ПБС сводится к последовательному расчету одиночных ветвей БКЧ (начиная от судна-буксировщика), образующих пространственную структуру ПБС, с учетом действия внешних сил. В результате предварительного расчета ПБС получают геометрические характеристики ветвей БКЧ в потоке и значения сосредоточенных сил, приложенных в узловых точках расположения углубителей, отводителей и поддерживающих устройств. Знание этих сил необходимо для предварительного гидродинамического расчета вышеперечисленных основных элементов ПБС.

По результатам предварительного гидродинамического расчета углубителей, отводителей и поддерживающих устройств проектируемой ПБС и последующей их конструктивной разработки, а также после проектирования механизмов, устройств и приборов, которые предназначаются для размещения на БКЧ, производится поверочный гидродинамический расчет основных элементов [176]. В этих расчетах необходимо учитывать влияние свивки троса и отрицательной плавучести БКЧ, поверочный расчет БКЧ, изготовленной из троса или КТ, рекомендуется выполнять по формулам В. И. Егорова [176], а обтекаемой БКЧ — по интегральным формулам А.С. Горшкова [324] или по таблицам В. И. Егорова.

Проектирование ПБС завершается поверочным расчетом пространственной схемы разрабатываемой системы с учетом результатов конструктивных разработок и экспериментальных исследований, выполненных в процессе проектирования. Таким образом, проектирование ПБС — процесс последовательных приближений, в котором сочетаются расчетные, конструкторские и экспериментальные методы.

Проектирование ПБС не строго регламентировано. Расчетные, конструкторские и экспериментальные работы осуществляются в определенном порядке [145]:

1. Обоснование выбора гидродинамической схемы ПБС с учетом номенклатуры, количества и основных технических характеристик механических и электрических связей, входящих в состав БКЧ.

2. Предварительный гидродинамический расчет основных характеристик выбранной схемы на основании технического задания.

3. Расчет (в случае необходимости) оптимальных параметров обтекаемой БКЧ по методу оптимизации ПБС с буксируемыми устройствами значительного сопротивления.

4. Выбор типа отводящей системы, экспериментальные исследования и предварительный гидродинамический расчет её основных параметров.

5. Выбор типа углубляющей системы, экспериментальные исследования и предварительный гидродинамический расчет ее характеристик, расчет основных элементов буксира.

6. Конструирование и расчеты на прочность отводящей системы, углубляющей системы и носителей аппаратуры.

7. Конструирование и расчеты прочности устройств, механизмов и соединительных деталей, входящих в состав ПБС.

8. Поверочный гидродинамический расчет ветвей БКЧ с учетом дополнительных сопротивлений.

9. Поверочный гидродинамический расчет отводящей и углубляющей системы с учетом дополнительных сопротивлений ветвей БКЧ.

10. Поверочный гидродинамический расчет проектируемой ПБС.

Вопросы проектирования элементов ПБС подробно изложены в работах [29, 109, 122, 137, 145, 159, 272].

Проектирование подводных аппаратов базируется на современной теории корабля, строительной механике и других судостроительных дисциплинах. Однако методы проектирования судов не учитывают особенностей подводного аппарата [29, с. 6].

Как отмечает профессор И. Б. Иконников [145, с. 4], конечной целью проектирования буксируемого ПА является создание носителя измерительной или рабочей аппаратуры заданного назначения, который обеспечивает установившиеся режимы движения на различных глубинах в определённом диапазоне скоростей буксировки, обладает достаточной прочностью, устойчивостью и управляемостью при изменении режима движения или наличии внешних воздействий.

Перед инженером, проектирующим буксируемую систему того или иного назначения, стоит задача создать изделие, имеющее определённые, указанные в задании технические параметры [145, с. 9]. Основными техническими параметрами, относящимися к буксируемым системам различных назначений и конструкции, являются следующие:

1) число судов для буксировки N;

2) наибольшая скорость буксировки V_{max};

3) наименьшая скорость буксировки V_{min};

4) натяжение, создаваемое буксируемой системой на наибольшей скорости, P_{Vmax};

5) ширина полосы поиска Z и ширина захвата буксируемой системы B;

6) отставание буксируемой системы X, в частности ведущего буксира $X_б$;

7) наибольшее углубление буксируемой системы h_{max};

8) наименьшее углубление буксируемой системы h_{min};
9) начальный $\alpha_р$ и конечный углы рабочей части буксира $\alpha'_р$;
10) начальный $\alpha_б$ и конечный углы ведущего буксира $\alpha'_б$;
11) длина рабочей части буксира $X_р$;
12) длина ведущего буксира $X_б$.

Стационарные МПС. Проектирование гидротехнических сооружений на континентальном шельфе зависит от разнообразных неблагоприятных воздействий окружающей среды [31, с. 129–130]. Для большинства сооружений наиболее опасные нагрузки возникают в условиях экстремального шторма в районе эксплуатации сооружения. Исключения возможны в полярных районах, где причиной разрушения сооружений могут стать обширные поля плавающего льда, или в сейсмически активных районах (наибольшую опасность представляют землетрясения).

За расчётные обычно принимаются экстремальные штормовые условия, имеющие повторяемость один раз в 100 лет. Параметры расчетного ветра назначаются в соответствии с методами, приведенными в главе 3 [31]. Поверхностные волны, учитываемые в статических расчетах, обычно характеризуются максимальной высотой и длиной регулярного волнения. Например, в табл. 2.4 приведены некоторые характеристики расчетного шторма, принятые для отдельных прибрежных районов США [31, с. 130].

Помимо назначения расчетных параметров ветрового и волнового воздействий необходимо учесть возможные в районе эксплуатации сооружения морские приливы, возникающие как в результате шторма, так и под влиянием притяжения Луны. Это требуется для того, чтобы назначить такое возвышение верхнего строения над уровнем моря, при котором маловероятно воздействие на него штормовых волн. Типичные возвышения платформы указаны в табл. 2.4 [31] вместе с данными о высоте волн. Для Мексиканского залива указанное возвышение отсчитывается от нижнего уровня воды, отмечаемого при приливно-отливных явлениях, а для залива Кука и пролива Св. Барбары, где колебания уровня при приливах носят более сложный характер, — от уровня, находящегося ниже нижнего уровня отлива.

На основании изучения местных условий должны быть также оценены расчетные скорости течения, которые следует добавить к скоростям движения воды, вызванного волнением. Особую роль может играть дрейфовое течение, связанное с действием штормового ветра на водную поверхность. В некоторых районах могут иметь значение также течения, связанные с приливами и речным стоком.

Таблица 2.4. Расчётные значения параметров шторма и возвышения платформы, принимаемые для отдельных морских районов США [31]

№	Район	Высота волны, м	Длина волны, м	Возвышение платформы над водой, м	Скорость ветра, м/с
1.	Мексиканский залив	21	250	14,5	45
2.	Залив Кука (Аляска)	18	240	17,0	45
3.	Пролив Св. Барбары Калифорния)	14	220	11,5	34

Перед расчетом проектируемого сооружения необходимо получить количественные оценки для всех основных нагрузок, которым оно может быть подвергнуто со стороны окружающей среды в океане. В инженерных расчетах воздействия окружающей среды характеризуются в основном ветром в приводном слое атмосферы, поверхностными волнами и течениями, возникающими в условиях жесткого шторма [31, с. 77].

Штормовой ветер играет существенную роль в расчете морского гидротехнического сооружения, поскольку он оказывает значительное силовое воздействие на надводную часть сооружения. Скорость ветра при урагане может, например, достигать 50 м/с, при этом горизонтальная ветровая нагрузка на типичное сооружение может превысить 500 кН [31].

Поверхностные волны в штормовых условиях также имеют важное значение в расчете прочности сооружения из-за значительных нагрузок на его подводную часть от сопровождающего волнение движения масс воды. Высота волны (разница между максимальным и минимальным уровнями воды в любой момент времени) в Мексиканском заливе достигает в период шторма 15 м, а вызванное ими движение воды оказывает на сооружение горизонтальную нагрузку, в несколько раз превышающую ветровую [31, с. 78].

Наконец, в некоторых районах моря существенную добавку к нагрузке на подводную часть сооружения могут оказать течения [31]. Под течением понимается общее движение масс воды, причины которого иные, чем те, которые вызывают поверхностные волны. Это, например, приливные течения, вызванные силами притяжения Луны и Солнца, ветровые или дрейфовые течения, связанные с трением воздушных потоков о поверхность воды, течения, связанные с речными стоками, и, наконец, океанические течения, обусловленные широкомасштабными ветровыми системами над океаном. В штормовых условиях поверхностные течения со скоростью 0,6 м/с и более не являются чем-то необычным: связанная с ними горизонтальная нагрузка на сооружение на 10% или более увеличивает нагрузку, вызванную волнами. Однако в каждом районе необходимо учитывать произошедшие изменения климата и соответственно вносить необходимые изменения в существующие методики расчёта.

2.5. Классификация режимов эксплуатации МПС на примере ПБС

Класс МПС весьма многообразен, о чём свидетельствует их классификация [386]. Функционирование МПС осуществляется в различных условиях эксплуатации и на различных режимах. Условно процесс функционирования МПС можно разбить на следующие этапы:

1. Подача (транспортировка) МПС к месту эксплуатации (функционирования).
2. Установка и подготовка МПС к функционированию на месте эксплуатации.
3. Начало эксплуатации системы (введение в действие, отладка системы).

4. Эксплуатация МПС (выход на проектные мощности, использование по назначению).

5. Окончание эксплуатации МПС и подготовка к выводу из эксплуатации.

6. Выведение МПС из эксплуатации.

7. Транспортировка к месту хранения (утилизации).

8. Хранение (утилизация) МПС.

В таблице 2.5 приведены режимы функционирования МПС на примере стационарной привязной системы (СПС), ППС и ПБС.

В таблице 2.6 приведен режимы функционирования однозвенной ПБС.

Режим [франц. régime, от лат. regimen — управление] [204, с. 433]:

– государственный строй, образ правления; совокупность методов, при помощи которых правящий класс осуществляет своё экономическое и политическое господство;

– точно установленный распорядок жизни: труда, отдыха, сна, питания и т.д.;

– система правил, мероприятий, установленных для достижения определённой цели (например, режим экономии);

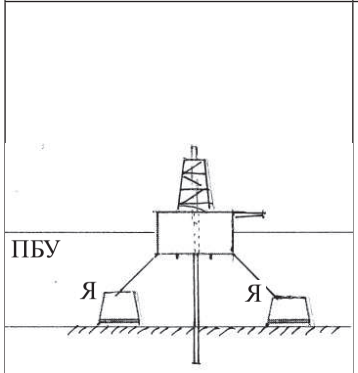
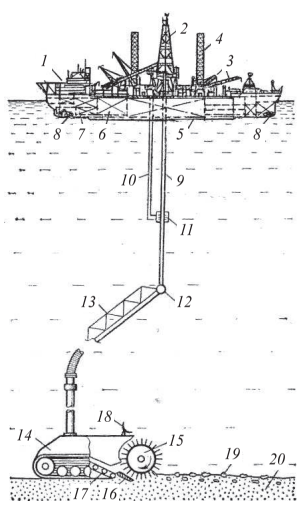
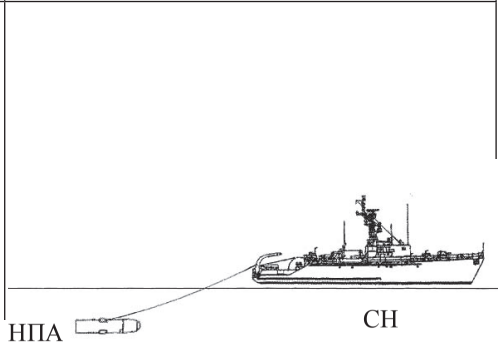
– условия деятельности, работы, существования чего.-л., например, режим работы.

Режим (в технике) — определённое, обычно заданное сочетание параметров работы оборудования или течения технологического процесса [187]. Иногда режим машины, технологического или другого процесса называется по основному определяющему параметру (напр., скоростной, температурный, давления, горения и т. п.). Совокупность параметров, обеспечивающая лучшие результаты, наз. экономическим или оптимальным режимом. Когда все характерные параметры процесса поддерживаются постоянными, то такой режим называется стационарным, установившимся или стабильным. При изменении параметров режим бывает неустойчивым, неустановившимся, нестабильным, переменным или переходным.

Различные нарушения нормальных условий в работе оборудования ведут к резкому понижению характеристик, которое обычно называют кавитационный режим, детонационный режим, турбулентный режим и др. В зависимости от характера внешних возмущающих и управляющих воздействий технический объект может находиться в установившемся или неустановившемся состоянии. Изменение его состояния выявляется анализом поведения фазовых координат [187, с. 30].

Установившееся состояние технической системы достигается при неизменных характеристиках внешних воздействий. Если воздействия непрерывно меняются, то состояние системы будет *неустановившимся.* Режим работы системы при этом называют *динамическим.* Он сопровождается непрерывным изменением фазовых координат, определяющих характер движения системы в динамическом неустановившемся режиме. Характерные примеры установившегося режима — *состояние покоя* и *состояние равномерного движения* всех элементов технической системы. Такие состояния также называют *статическими* или *равновесными.* Статичность состояния определяется неизменностью реакций взаимодействия всех элементов технической системы при постоянных внешних воздействиях.

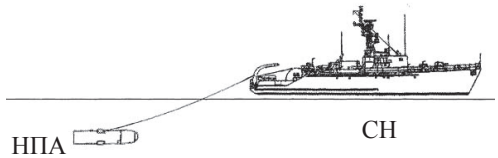
Таблица 2.5. Режимы функционирования МПС (примеры)

№ п/п	Режим функционирования МПС	Тип морской привязной системы (МПС) и описание режима функционирования системы		
		Стационарные привязные системы (СПС)	Привязные подводные системы (ППС)	Подводные буксируемые системы (ПБС)
		Погружная буровая установка — ПБУ	Устройство для добычи конкреций	Буксируемая система — буксировка НПА (прибора, ГАС, ГПБА и т. п.) за СН
				
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1.	Подача (транспортировка, доставка) МПС к месту функционирования (эксплуатации)	1. Транспортировка СПС — ПБУ к месту эксплуатации путём буксировки или на ВП судна-тяжеловоза	1. Транспортировка устройства для добычи конкреций (ППС) на судне обеспечения работ	1. Транспортировка подводной буксируемой системы (ПБС) на судне-носителе к месту проведения работ

Окончание таблицы 2.5

1	*2*	*3*	*4*	*5*
2.	Установка и подготовка МПС к функционированию на месте эксплуатации	2. Установка СПС — ПБУ на месте эксплуатации (бурения — добычи углеводородов): установка на якоря, приведение модулей системы в рабочее состояние, проведение пробных бурений	2. Установка судна обеспечения и ППС на месте эксплуатации (сбора — добычи конкреций) и подготовка системы к функционированию (установка судна на якоря, спуск под воду и приведение модулей системы: трубопровода, воздухопровода, смесителя, шарового шарнира, фермы, собирающего устройства, сгребателя, лемеха конвейера в рабочее состояние)	2. Подготовка ПБС на судне-носителе к проведению операции по буксировке ПБС (в процессе подготовки системы к постановке производится её сборка на судне-носителе, оснащение необходимыми элементами — приборами, заглубителями, отводителями, обтекателями кабель-троса и т.п.), подготовка СПУ к работе
3.	Начало эксплуатации (введение в действие, отладка системы)	3. Подготовка СПС – ПБУ к функционированию (уточнение режимов бурения и т. п.)	3. Проведение пробных операций по сбору конкреций, отладка режимов	3. Режим постановки ПБС — осуществляется опускание системы в воду (при неподвижном судне-носителе) на заданную глубину или травление кабель-троса, проверка и подключение питания, спуск НПА (травление кабель-троса и т.п.)
4.	Эксплуатация МПС (использование по назначению, выход на проектные мощности)	4. Промышленная эксплуатация месторождения, выход СПС (ПБУ) на проектные мощности	4. Промышленная эксплуатация месторождения конкреций, выход устройства для добычи конкреций (ППС) на проектные мощности	4. Режим разгона и выхода судна-носителя на заданный режим буксировки, рабочий режим — буксировка ПБС (для двухзвенных систем — выход НПА (робот-модуль) из «гаража»)
5.	Окончание эксплуатации МПС и подготовка к выводу из эксплуатации.	5. Окончание эксплуатации СПС (ПБУ): прекращение операций бурения и подготовка к выводу из эксплуатации отдельных модулей	5. Окончание эксплуатации ППС — устройства для добычи конкреций (прекращение операций по сбору конкреций)	5. Режим торможения СН и остановки: осуществляется процесс подъёма системы (процесс выборки кабель-троса, подъём НПА, отключения электропитания)
6.	Выведение МПС из эксплуатации	6. Полное окончание эксплуатации СПС (ПБУ) и подготовка к транспортировке	6. Процесс разборки подводной части ППС — устройства для добычи конкреций (подъём на судно обеспечения работ элементов устройства и размещение на палубе или в трюмах судна обеспечения), подготовка к транспортировке	6. Процесс разборки ПБС: разборка буксирной линии и размещение её на судне (намотка кабель-троса на вьюшки или барабаны, размещение НПА на стеллажах, ложементах или киль-блоках), подготовка к транспортировке
7.	Транспортировка к месту хранения (утилизации)	7. Транспортировка СПС (ПБУ) к месту хранения или утилизации путём буксировки своим ходом или на ВП судна-тяжеловоза	7. Транспортировка ППС к другому месту работы на судне для обеспечения работ (новому месторождению), ремонта, хранения или утилизации	7. Транспортировка ПБС к другому месту работы на СН, для ремонта, хранения или утилизации

Таблица 2.6. Режимы функционирования однозвенной ПБС

№ п/п	Режим функционирования ПБС	Тип морской привязной системы (МПС) и описание режима функционирования системы
		Подводные буксируемые системы (ПБС)
		Буксируемся система — буксировка НПА (прибора, ГАС, ГПБА и т.п.) за СН
		
1.	Подача (доставка, транспортировка) МПС к месту эксплуатации (функционирования)	1. Транспортировка подводной буксируемой системы (ПБС) на судне-носителе к месту проведения работ
2.	Установка и подготовка МПС к функционированию на месте эксплуатации	2. Подготовка ПБС на судне-носителе к проведению операции по буксировке ПБС (в процессе подготовки системы к постановке производится её сборка на судне-носителе, оснащение необходимыми элементами — приборами, заглубителями, отводителями, обтекателями кабель-троса и т. п.), подготовка СПУ к работе
3.	Начало эксплуатации (введение в действие, отладка системы)	3. Режим постановки ПБС — осуществляется опускание системы в воду (при неподвижном судне-носителе) на заданную глубину или травление кабель-троса, проверка и подключение питания, спуск НПА (травление кабель-троса и т.п.)
4.	Эксплуатация МПС (использование по назначению, выход на проектные мощности)	4. Режим разгона и выхода судна-носителя на заданный режим буксировки, рабочий режим — буксировка ПБС (для двухзвенных систем — выход НПА (робот-модуль) из «гаража»)
5.	Окончание эксплуатации МПС и подготовка к выводу из эксплуатации	5. Режим торможения СН и остановки, осуществляется процесс подъёма системы (процесс выборки кабель-троса, подъём НПА, отключения электропитания)
6.	Выведение МПС из эксплуатации	6. Процесс разборки ПБС (разборка буксирной линии и размещение её на судне (намотка кабель-троса на вьюшки или барабаны, размещение НПА на стеллажах или ложементах, киль-блоках), подготовка ПБС к транспортировке
7.	Транспортировка к месту утилизации (хранения)	7. Транспортировка ПБС к другому месту работы, ремонта, утилизации или хранения на СН

Предположим, что на техническую систему, находящуюся в установившемся состоянии равновесия, в некоторый момент времени t_0 приложено ступенчатое воздействие вида [187]:

$$F(t) = \begin{cases} F_0, t \geq t_0; \\ 0, t < t_0, \end{cases} \tag{2.1}$$

где $F_0 = const$ — модуль ступенчатого воздействия.

Движение системы будет определяться ее внутренними физическими свойствами и внешним воздействием. Если состояние технической системы характеризуется фазовой координатой $x(t)$, изменение ее после приложения ступенчатого воздействия можно представить в виде суммы двух составляющих: переходной $x_{п}(t)$ и вынужденной $x_{в}(t)$. Переходная составляющая устойчивой технической системы с течением времени затухает (стремится к нулю) и система приходит в новое установившееся состояние равновесия, характеризуемое вынужденной составляющей $x_{в}(t) = x_{к} = \text{const}$ [187, с. 31]. При приложении ступенчатого воздействия система осуществляет переход из одного установившегося состояния в другое, находясь при этом в течение некоторого времени в динамическом режиме, который называют *переходным процессом,* а графики изменения фазовых координат системы — *переходными характеристиками.* Переходные процессы возникают также при изменении структуры или параметров технической системы в процессе ее функционирования.

Если внешние воздействия на систему переменны во времени, то они вызывают в ней непрерывный ряд переходных процессов и состояние системы в течение всего времени наблюдения будет неустановившимся.

Если внешнее воздействие $F(t)$ — периодическая функция, для которой $F_0 = A\sin(w_{в}t + \varphi)$ (см. формулу (2.1)) [187, с. 31], то после затухания свободных колебаний (переходной составляющей) в устойчивой системе установятся вынужденные колебания с частотой $\omega_{в}$ и некоторыми постоянными амплитудами $A_{Bi} = k_i A$, где k_i — постоянный коэффициент, i — номер фазовой координаты системы. Такое состояние системы также относится к установившемуся, а режим называют *стационарным режимом колебаний.*

Рассмотренные динамические режимы технических объектов являются *модельными* [187]. Они предназначены для проведения сравнительного анализа множества альтернативных вариантов в процессе синтеза. На самом деле в техническом объекте такие режимы в чистом виде практически не встречаются. Однако модельные режимы позволяют значительно облегчить и ускорить решение проектных задач, так как детерминированные модели гораздо проще вероятностных. Получаемая при этом информация об объекте хотя и не претендует на полноту, но оказывается практически полезной. Детерминированное моделирование широко используется на начальных стадиях проектирования. Заключительные стадии проектирования выполняют на вероятностных моделях.

Внешние воздействия реальной среды обитания технической системы описываются случайными функциями, а изменения фазовых координат системы представляют собой случайные процессы. Техническая система в этом случае все время находится в динамическом режиме. При постоянных характеристиках случайных процессов их называют *стационарными,* а при переменных — *нестационарными.* Способы анализа и оценки выходных параметров системы при стационарных и нестационарных случайных процессах различны. В последнем случае они значительно сложнее, чем в первом, поэтому необходимость учета нестационарности при моделировании должна быть обоснованной [187, с. 32].

В [187] рассмотрены основные задачи анализа, решаемые при проектировании технических систем. В зависимости от модельного режима, положенного в основу решения конкретной проектной задачи, различают следующие виды анализа: статических состояний; переходных процессов; устойчивости; стационарных режимов колебаний; частотных характеристик; чувствительности; статистический.

Анализ статических состояний относится к задачам статики, а остальные виды анализа — к задачам динамики.

На макроуровне проектирования исходная математическая модель технического объекта представляет собой систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, которая в нормальной форме Коши имеет вид [187, с. 32]:

$$d\vec{V}/td = \vec{F}(\vec{V}, \vec{U}, t), \tag{2.2}$$

где $\vec{V}$ — вектор фазовых координат; $\vec{U}$ — вектор внешних воздействий; t — независимая переменная — время.

Параметры элементов технического объекта $\vec{X}$ тоже входят в математическую модель (2.2), но только в качестве коэффициентов при переменных $\vec{V}$.

Выходные параметры объекта $\vec{Y}$ непосредственно не фигурируют в системе (2.2). Они определяются по результатам решения $\vec{V}(t)$ системы уравнений. Большинство выходных параметров имеют смысл функционалов зависимостей фазовых координат $\vec{Y} = [\vec{V}(t)]$.

Функционал представляет собой отображение класса функций в класс чисел. Примеры функционалов: определенные интегралы, экстремальные значения функций, значения функций при заданных значениях аргументов и т.п.

Система уравнений (2.2) описывает динамические режимы функционирования технического объекта. Анализ этих режимов заключается в решении системы уравнений (2.2) и последующем определении выходных параметров объекта. Задавая начальные условия $\vec{V}(0) = \vec{V}_0$, находят решения $\vec{V}(t)$, а затем вычисляют значения выходных параметров $\vec{Y}$, используемых в качестве критериев при оптимизации внутренних параметров объекта $\vec{X}$ [187, с. 32].

Критерии — это показатели качества и эффективности технического объекта. Их подразделяют на следующие группы: назначения; надежности; экономного использования сырья, материалов, топлива, энергии и трудовых ресурсов (экономические); ограничения вредных воздействий продукции (экологические); безопасности; стандартизации и унификации.

Математическая модель в виде (2.2) непосредственно используется при анализе переходных процессов, устойчивости, стационарных режимов колебаний. Эта же модель позволяет решать и задачи анализа статических состояний. Численное решение системы уравнений (2.2) при неизменных внешних воздействиях через конечный отрезок времени t_K приводит к стационарной точке $\vec{V}^*$, в которой $d\vec{V}/td = 0$. Это и будет точкой решения задачи статики.

Математической моделью статических состояний является система алгебраических уравнений. Очевидно, что при $d\vec{V}/td = 0$ система дифференциальных уравнений (2.2) оказывается системой алгебраических уравнений [187, с. 32]:

$$\vec{F}(\vec{V}, \vec{U}) = 0. \quad (2.3)$$

Решение уравнений (2.3), безусловно, проще, однако не всегда процедура перехода от уравнений (2.2) к уравнениям (2.3) тривиальна. Например, для получения математической модели, описывающей состояние покоя технической системы, требуются соответствующие преобразования уравнений, обусловленные необходимостью перехода к геометрическим координатам, определяющим пространственное положение элементов системы [187, с. 32].

2.6. Эксплуатационные задачи морских привязных систем

Эксплуатация ГС МПС осуществляется в разнообразных условиях. При их расчетах выделяют следующие задачи [172]:

1) статические;
2) квазистатические;
3) динамические.

По виду внешних воздействий различают задачи [14, 172, 186]:

1) с заданными внешними нагрузками;
2) с заданными перемещениями;
3) с заданными перемещениями и внешними нагрузками;
4) задачи, которые обусловлены силами трения.

В зависимости от формы гибких связей во время работы задачи, связанные с их расчетом, подразделяются на пространственные, плоские и линейные.

При проектировании и эксплуатации ППС с СПА стационарные задачи, в которых объекты занимают неизменное положение в пространстве при неизменных характеристиках потока и воспринимают постоянные во времени внешние нагрузки, являются квазистатическими [122]. Состояние системы описывается уравнениями статики, хотя действующие на нее силы по своей природе гидродинамические. Динамическая задача для рассмотренной системы связана с гидродинамической. Опыт проектирования и эксплуатации систем с СПА для задач шельфа показывает, что в уравнениях движения элементов таких систем допустимо использование упрощенных выражений для внешних сил, присоединенных масс жидкости, гидродинамических сил потока жидкости.

Динамика процессов учитывается инерционными членами уравнений движения, динамическими составляющими элементов систем в жидкости.

Поскольку мы рассматриваем МПС, в составе которых есть ГС, естественно, нас будет интересовать процесс описания их динамики. Главное свойство канатов и цепей — их высокая податливость при изгибе и неспособность к восприятию сжимающих усилий.

Это позволяет при расчетах моделировать канаты и цепи гибкой нитью — линейным телом очень малых поперечных размеров, не воспринимающим изгибающих моментов, перерезывающих сил и продольных сжимающих нагрузок [338, с. 54].

В зависимости от типа носителя и по месту позиционирования МПС могут быть условно разбиты на 5 классов (табл. 2.7 – 2.11).

Как видим, класс МПС, имеющих в своём составе ГС, довольно многообразен и в рамках данного раздела монографии описание всех возможных случаев статики и динамики МПС с ГС практически невозможен. Этим вопросам посвящены работы авторов [8, 11, 14, 16, 29–31, 53, 80, 96, 102, 105, 106, 116, 121, 122, 127, 137, 145, 147, 156, 159, 172, 176, 192, 200–202].

Вопросы, посвящённые динамике ГС МПС, будут рассмотрены в разделе 3.

Выводы по Разделу 2

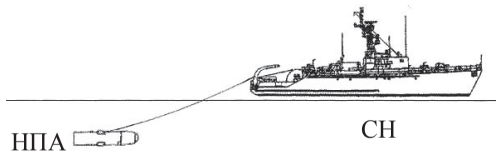
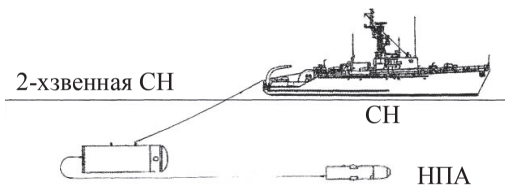
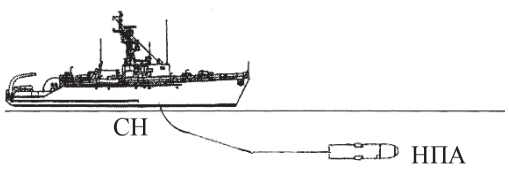
Во втором разделе рассмотрены вопросы классификации и состава МПС, технического обеспечения глубоководных исследований с помощью МПС с ГС, структура и классификация ППС и ПБС, результаты теоретических и экспериментальных исследований МПС, классификация режимов эксплуатации МПС на примере ПБС, а также эксплуатационные задачи морских привязных систем.

В настоящее время использование МПС и развитие морской техники требуют создания принципиально новых конструкций. Расширяются диапазоны допускаемых режимов их использования — скоростей движения, рабочих глубин подводных аппаратов, ППС и ПБС, и условий воздействия внешней среды (степени волнения моря, скорости течения, уклонов дна, прозрачности морской воды и т.п.), необходимости действовать как в воздушной, так и в водной среде.

Исследованию ГС МПС посвящены достаточно много работ, однако существующие уравнения динамики ГС имеют довольно сложный и громоздкий вид и практически не позволяют использовать их в инженерных расчётах. Анализ проектных задач при создании МПС, например, ППС и ПБС, показывает, что значительную теоретическую сложность и наукоёмкость приобретают расчёты ГС МПС, прочность и надёжность их элементов.

Возникновение новых задач в освоении Мирового океана, морей и внутренних водоёмов, совершенствование и развитие МПС дало толчок развитию существующих и появлению новых отраслей науки и техники, конструкционных материалов и приборов, внедрению инноваций и новых технологий. В связи с этим наверняка будет развиваться и совершенствоваться классификация МПС.

Таблица 2.7. I. Морские привязные системы: надводный носитель (СН – НК)

№ п/п	Схема	Название	Характеристика особенностей движения в рамках выполняемой операции	Назначение
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1.		Буксировка НПА (прибора, ГАС и т.п.) за СН	СН движется, НПА буксируется за СН	Исследование дна: картографирование, взятие образцов, находящихся на дне; исследование параметров воды; поиск затонувших объектов
2.		Буксировка 2-звенной ППС за СН	1) СН движется, 2-звенная ППС буксируется за СН. 1-е звено — носитель НПА («гараж»); 2-е звено — НПА	Исследование дна: картографирование, взятие образцов, находящихся на дне, исследование поверхностных слоёв грунта; исследование параметров воды; поиск затонувших объектов; поиск МПО; разминирование; ремонт газо- и нефтепроводов, подводных конструкций и оснований ПБУ и ППБУ
3.		НПА выпускается из СН	1) СН — неподвижно, $V_{СН} = 0$, НПА движется, $V_{НПА} > 0$; 2) СН — дрейфует, $V_{СН} = V_{ТЕЧ.}$, НПА движется, $V_{НПА} > 0$; 3) СН — движется, $V_{СН} > 0$; НПА движется, $V_{НПА} > 0$	Исследование параметров воды; поиск затонувших объектов, поиск мин и МПО, разминирование

Окончание таблицы 2.7

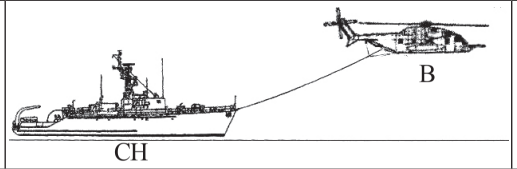
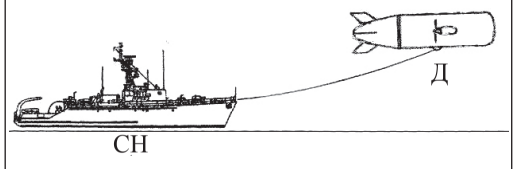
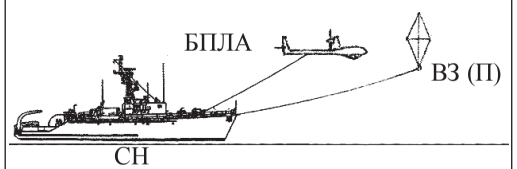
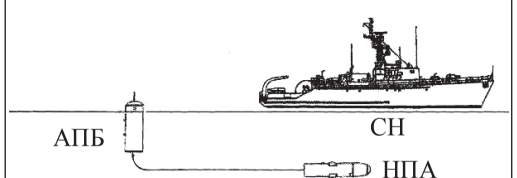
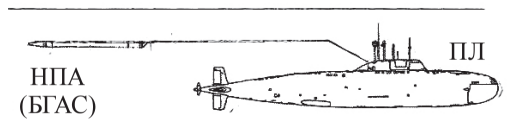
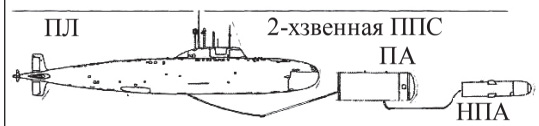
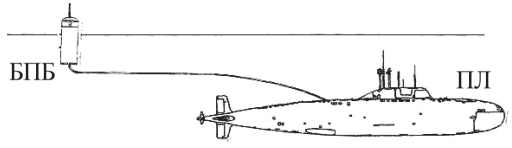
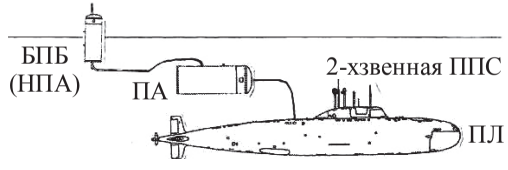
1	*2*	*3*	*4*	*5*
4.		Буксировка СН вертолётом В	1) СН — неподвижно, $V_{СН} = 0$, В движется, $V_В > 0$ (В буксирует СН)	В случае возникновения аварийной ситуации возможна буксировка В аварийного СН
5.		Буксировка дирижаблем Д небольших СН	1) Буксировка СН дирижаблем Д: СН — неподвижно, $V_{СН} = 0$, Д движется, $V_Д > 0$ (Д буксирует СН); 2) Выпуск Д с СН: СН — неподвижно, $V_{СН} = 0$, или движется, $V_{СН} > 0$; Д движется, $V_Д > 0$, или неподвижен, $V_Д = 0$	1) В случае возникновения аварийной ситуации возможна буксировка В аварийного СН. 2) Выпуск с СН Д для освещения воздушной (ПВО) и надводной обстановки (на Д установлена РЛС, АФА или находится наблюдатель)
6.		1) Выпуск ВЗ (П) с СН (на ВЗ установлена РЛС, АФА или находится наблюдатель); 2) Выпуск с СН привязного БПЛА (на БПЛА установлена РЛС или АФА)	1) Выпуск ВЗ (П) с СН: СН — неподвижно, $V_{СН} = 0$, ВЗ неподвижен, $V_{ВЗ} = 0$. 2) Выпуск привязного БПЛА с СН: СН — неподвижно, $V_{СН} = 0$, или движется, $V_{СН} > 0$, БЛА неподвижен, $V_{БЛА} = 0$, или движется, $V_{БЛА} > 0$	1) Выпуск с СН ВЗ (П) для освещения воздушной (ПВО) и надводной обстановки (на ВЗ установлена РЛС, АФА или находится наблюдатель). 2) Выпуск с СН БПЛА для освещения воздушной (ПВО) и надводной обстановки (на БПЛА установлена РЛС, АФА).
7.		Выпуск с СН 2-звенной ПС (АПБ — 1-е звено; НПА — 2-е звено)	Выпуск с СН АПБ, который выпускает НПА: СН — неподвижно, $V_{СН} = 0$, или движется, $V_{СН} > 0$; АПБ неподвижен, $V_{АПБ} = 0$, или дрейфует, $V_{АПБ} = V_{ДР.}$; НПА движется, $V_{НПА} > 0$	Выпуск с СН радио-АПБ с НПА с целью картографирования дна, взятие образцов, находящихся на дне, исследование поверхностных слоёв грунта; исследование параметров воды; поиск затонувших объектов, информация сразу же передаётся на СН в масштабе реального времени

Таблица 2.8. II. Морские привязные системы: подводный носитель (ПЛ–ПА)

№ п/п	Схема	Название	Параметры, характеристика особенностей движения в рамках выполняемой операции	Назначение
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1.		Буксировка ПЛ в подводном положении НПА или буксируемой гибкой антенны (БГАС)	1) ПЛ находится в движении, $V_{ПЛ} > 0$; $V_{БГАС} = V_{ПЛ}$	Выпуск и буксировка ПЛ НПА или БГАС с целью освещения подводной обстановки
2.		Выпуск ПЛ 2-звенной ППС	1) ПЛ находится в движении, $V_{ПЛ} > 0$; $V_{ПА} > 0$; $V_{НПА} > 0$; 2) ПЛ находится в дрейфе, $V_{ПЛ} = V_{ДР.}$; $V_{ПА} > 0$; $V_{НПА} > 0$; 3) ПЛ зависла на глубине или находится на грунте, $V_{ПЛ} = 0$; $V_{ПА} > 0$; $V_{НПА} > 0$	Выпуск ПЛ 2-звенной ППС, состоящей из 1-го звена — «гаража» и 2-го звена — НПА или БГАС с целью освещения подводной обстановки
3.		Выпуск ПЛ БПБ	1) ПЛ находится в движении, $V_{ПЛ} > 0$; $V_{БПБ} > 0$; 2) ПЛ находится в дрейфе, $V_{ПЛ} = V_{ДР.}$; $V_{БПБ} = V_{ДР}$; 3) ПЛ зависла на глубине или находится на грунте, $V_{ПЛ} = 0$; $V_{БПБ} = 0$	Выпуск (или буксировка) ПЛ на поверхность БПБ с антенной с целью передачи или получения сообщений
4.		Выпуск ПЛ 2-звенной ППС с ПА и БПБ (НПА)	1) ПЛ находится в движении, $V_{ПЛ} > 0$; $V_{ПА} > 0$; $V_{БПБ} > 0$; 2) ПЛ находится в дрейфе, $V_{ПЛ} = V_{ДР.}$; $V_{ПА} > 0$; $V_{БПБ} > 0$; 3) ПЛ зависла на глубине или находится на грунте, $V_{ПЛ} = 0$; $V_{ПА} > 0$; $V_{БПБ} = 0$	Выпуск ПЛ 2-звенной ППС, состоящей из 1-го звена — «гаража» и 2-го звена — НПА или БПБ с антенной с целью передачи или получения сообщений, освещения подводной обстановки

Окончание таблицы 2.8

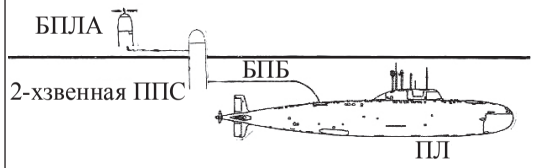
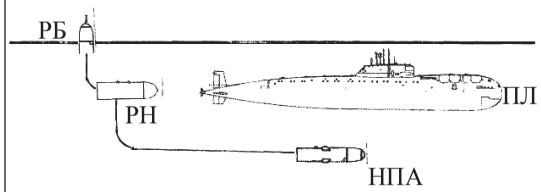
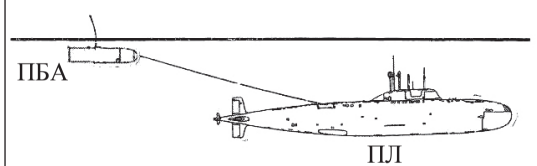
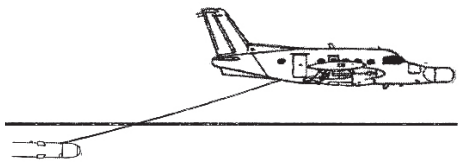
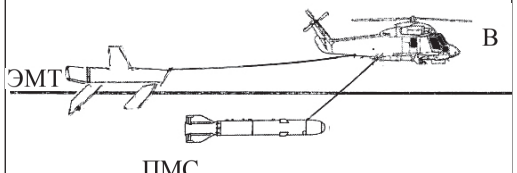
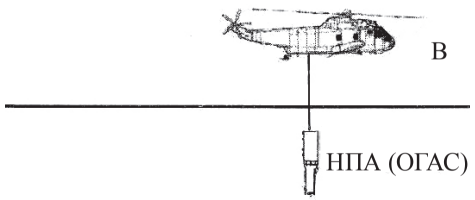
1	*2*	*3*	*4*	*5*
5.		Выпуск ПЛ 2-звенной ППС с ПА (БПБ) и БПЛА	1) ПЛ находится в движении, $V_{ПЛ} > 0$; $V_{БПБ} > 0$; $V_{БПЛА} > 0$; 2) ПЛ находится в дрейфе, $V_{ПЛ} = V_{ДР.}$; $V_{БПБ} = V_{ДР}$; $V_{БПЛА} > 0$; 3) ПЛ зависла на глубине или находится на грунте, $V_{ПЛ} = 0$; $V_{БПБ} = 0$; $V_{БПЛА} > 0$	С целью освещения воздушной, надводной и подводной обстановки
6.		Выпуск РН радиобуя РБ и НПА (1- или 2-звенной системы)	1) ПЛ находится в движении, $V_{ПЛ} > 0$; РБ находится на поверхности, $V_{РБ} = V_{РН.}$; РН находится в движении, $V_{РН.} > 0$; НПА находится в движении, $V_{НПА.} > 0$; 2) ПЛ находится в дрейфе, $V_{ПЛ} = V_{ДР.}$; РБ находится на поверхности, $V_{РБ} = V_{РН.}$; РН находится в движении, $V_{РН.} > 0$; НПА находится в движении, $V_{НПА.} > 0$; 3) ПЛ зависла на глубине или находится на грунте, $V_{ПЛ} = 0$, РБ находится на поверхности, $V_{РБ} = V_{РН.}$; РН находится в движении, $V_{РН.} > 0$; НПА находится в движении, $V_{НПА.} > 0$	С целью освещения воздушной, надводной и подводной обстановки и выполнения НПА необходимых работ в соответствии с заданием
7.		ПЛ выпустила ПБА	1) ПЛ находится в движении, $V_{ПЛ} > 0$; РБ находится на поверхности, $V_{РБ} = V_{РН}$; РН находится в движении, $V_{РН} > 0$; НПА находится в движении, $V_{НПА} > 0$; 2) ПЛ находится в дрейфе, $V_{ПЛ} = V_{ДР}$; РБ находится на поверхности, $V_{РБ} = V_{РН}$; РН находится в движении, $V_{РН} > 0$; НПА находится в движении, $V_{НПА} > 0$; 3) ПЛ зависла на глубине (находится на грунте), $V_{ПЛ} = 0$, РБ находится на поверхности, $V_{РБ} = V_{РН}$; РН находится в движении, $V_{РН} > 0$; НПА находится в движении, $V_{НПА} > 0$	Для связи ПЛ с КП, получения необходимых указаний и т. п.

Таблица 2.9. III. Морские привязные системы: воздушный носитель (ЛА: С – В)

№ п/п	Схема	Название	Параметры, характеристика особенностей движения в рамках выполняемой операции	Назначение
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1.		Буксировка самолётом С НПА (ГАС) под водой или по поверхности воды	1) Буксировка С НПА (ОГАС): С движется, $V_C > 0$, НПА движется, $V_{НПА} = V_{БУКС.}$	Самолёту С за счёт более высокой скорости, чем у вертолёта В, удаётся обследовать район большей площади (поиск ПЛ, МПО, исследование поверхности дна, поиск затонувших объектов, взятие проб воды и т. п.)
2.		Буксировка вертолётом В НПА (ПМС) под водой или электромагнитного трала (ЭМТ) по поверхности воды	1) Буксировка В НПА (ПМС): В движется, $V_B > 0$, ПМС движется, $V_{ПМС} = V_{БУКС.}$	Вертолёт В буксирует по поверхности воды ЭМТ с целью разминирования акватории или под водой ПМС с той же целью
3.		Вертолёт В опускает ОГАС с целью обнаружения ПЛ	Вертолёт В завис над водой, $V_B = 0$, ОГАС опускается на заданную глубину для «прослушивания» подводной толщи воды, $V_{ОГАС} = V_{ОП.ЛЕБ.}$	С целью обнаружения ПЛ с помощью ОГАС

Окончание таблицы 2.9

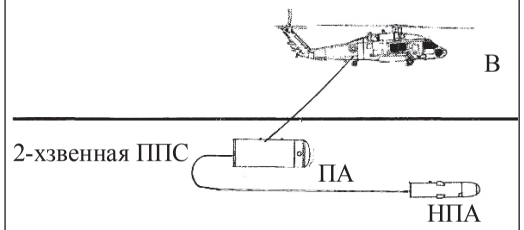
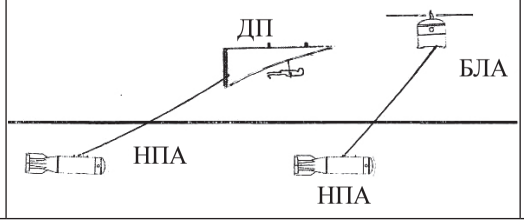
1	*2*	*3*	*4*	*5*
4.		Буксировка вертолётом В 2-звенной ППС	1) Вертолёт В буксирует 2-звенную ППС, $V_{В} = V_{БУКС.}$: 1-е звено — носитель НПА («гараж»); 2-е звено — НПА. 2) Вертолёт В завис над водой, $V_{В} = 0$, выпускает 2-звенную систему	С целью освещения подводной обстановки, картографирования дна, взятие образцов на дне, исследование поверхностных слоёв грунта, параметров воды; поиск затонувших объектов, ремонт подводных сооружений
5.		1) Буксировка БЛА НПА с ГАС, ПМС или др. оборудованием; 2) Буксировка дельта-планом ДП НПА с ГАС, ПМС или др. оборудованием	1) БЛА буксирует НПА, $V_{БЛА} = V_{БУКС.}$, $V_{НПА} = V_{БУКС.}$; 2) БЛА завис над поверхностью воды, $V_{БЛА} = 0$, $V_{НПА} > 0$	С целью освещения подводной обстановки, поиск затонувших объектов, мин и МПО (на мелководье, в условиях плохой видимости под водой, сильного течения)

Таблица 2.10. IV. Морские привязные системы: дрейфующие (ПБ)

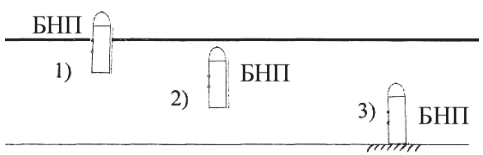
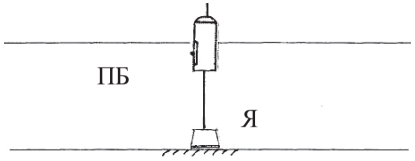
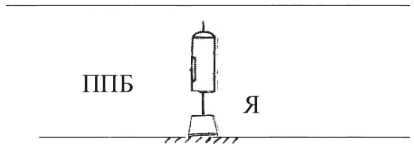
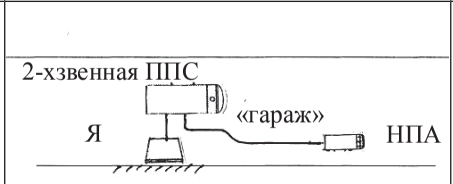
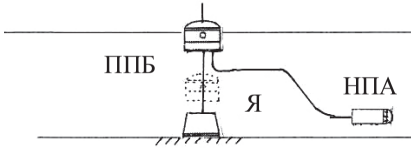
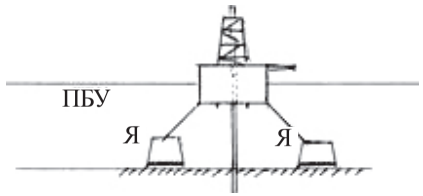
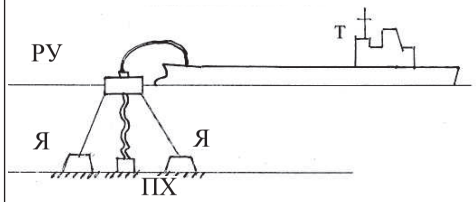
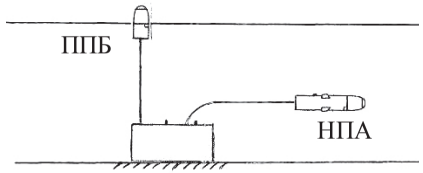
№ п/п	Схема	Название	Параметры, характеристика особенностей движения в рамках выполняемой операции	Назначение
1.		Плавучий БНП дрейфует (может всплывать и погружаться в соответствии с заложенной в нём программой)	1) БНП находится в движении на поверхности воды, $V_{БНП} > 0$; 2) БНП находится под водой в дрейфе, $V_{БНП} = V_{ДР}$, или завис на глубине, $V_{БНП} = 0$; 3) БНП $V_{БНП} = V_{ДР}$ находится на грунте $V_{БНП} = 0$	Картографирование дна, исследование параметров воды, температуры воздуха и др. гидрометеорологических условий поиск МПО, наблюдение

Таблица 2.11. V. Морские привязные системы: надводный носитель: стационарные

№ п/п	Схема	Название	Параметры, характеристика особенностей движения в рамках выполняемой операции	Назначение
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1.		Плавучий буй ПБ закреплён на неподвижном подводном основании Я (но может всплывать и погружаться)	ПБ неподвижен (закреплён на неподвижном подводном основании Я), $V_{ППБ} = 0$	Используется для наблюдения, регистрации параметров окружающей среды (подводной и надводной) и передачи их в центр
2.		Плавучий погружной буй ППБ закреплён на неподвижном подводном основании Я (но может всплывать и погружаться)	ППБ может всплывать и погружаться согласно заложенной в него программе или по командам центра, $V_{ППБ} = V_{ВСПЛ.(ПОГР.)}$	Используется в условиях скрытности для наблюдения, регистрации параметров окружающей среды (подводной и надводной) и передачи их в центр
3.		2-звенная ППС с НПА закреплена на неподвижном подводном основании Я	2-звенная ППС с НПА закреплена на неподвижном подводном основании Я, состоит из: 1-е звено — носитель НПА («гараж»); 2-е звено — НПА, $V_1 = 0$, $V_{НПА} > 0$	Применяется в составе комплекса обороны побережья от НК, МПЛ, диверсионных групп, обеспечивая необходимую скрытность
4.		Погружной плавучий буй ППБ закреплён на неподвижном подводном основании Я	Погружной плавучий буй ППБ может выпускать НПА. ППБ закреплён на неподвижном подводном основании Я, $V_{ППБ} = 0$, $V_{НПА} > 0$	Применяется в составе комплекса обороны побережья от НК, МПЛ, диверсионных групп, обеспечивая необходимую скрытность на мелководье

Окончание таблицы 2.11

1	*2*	*3*	*4*	*5*
5.		ПБУ закреплена на неподвижном подводном основании Я	ПБУ неподвижна (закреплена на неподвижном подводном основании Я), $V_{ПБУ} = 0$	Применяется в составе морского бурового комплекса для добычи нефти (бурения скважин)
6.		РУ закреплено на неподвижном подводном основании Я	РУ неподвижно (закреплено на неподвижном подводном основании Я), $V_{РУ} = 0$	Применяется в составе МПС для передачи нефти (газа) на танкер (газовоз) из подводного (подземного) хранилища нефти
7.		РН (2-звенная или 3-звенная система) жёстко закреплён на дне (Я) и может выпускать ППБ и НПА	1) ППБ может всплывать и погружаться из РН согласно заложенной в него программе или по командам центра, $V_{ППБ} = V_{ВСПЛ.(ПОГР.)}$ или $V_{ППБ} = 0$; 2) РН может выпускать НПА, который действует в соответствии с заложенной в него программой или по командам с центра управления, $V_{НПА} > 0$	Применяется в составе комплекса обороны побережья от НК, МПЛ, диверсионных групп, обеспечивая необходимую скрытность

Принятые сокращения к схемам в таблицах:

М — мина;
МПО — миноподобные объекты;
НК — надводный корабль;
НПА — необитаемый подводный аппарат;
ПБ — плавучий буй;
ПЛ — подводная лодка;
МПЛ — малая ПЛ;
МПС — морская привязная система;
ПБУ — буксируемый подводный аппарат;
ПлБУ — плавучие буровые установки;
ПМС — противоминная система;
ПС — привязная система;
ППС — подводная привязная система;
ППБУ — полупогружные ПБУ;
РБ — радиобуй;
ППБ — плавучий погружной буй;
ПХ — подземное хранилище нефти;
РЛС — радиолокационная станция;
РН — робот-носитель (НПА);
РУ — раздаточное устройство;
С — самолёт;
СН — судно-носитель;
Т — танкер;
Я — неподвижное подводное основание (якорь).

3

ГИБКИЕ СВЯЗИ МОРСКИХ ПРИВЯЗНЫХ СИСТЕМ

Как уже отмечалось, в качестве ГС на флоте применяются цепи, стальные и синтетические канаты, грузонесущие кабели, кабель-тросы (КТ), способные передавать как механические усилия, так и обеспечивать при необходимости энергетическую и информационную связь между модулями привязной системы, между привязной системой и носителем (судном, подводной лодкой, летательным аппаратом и т.п.). Модулями могут служить буксируемые ПА, носители подводной аппаратуры, углубители и отводители, тралы, буи, управляемые донные механизмы и другие подобные устройства.

3.1. Классификация гибких связей, используемых в морских привязных системах

Автор, изучая литературу [11, 14, 136, 137, 145, 159, 172, 183, 193, 194, 202], не обнаружил существующей классификации ГС, применяемых в МПС. По отдельным признакам ГС (в основном стальные канаты и цепи) ГС классифицируются в [176, 202].

Наиболее полно канаты (тросы), которые используются в подводных буксируемых системах (ПБС), характеризуются в [159, 172, 176, с. 53–59; 201]. В [190, с. 115, Приложение 2] объединенная классификация стальных канатов приводится по конструктивным признакам и по видам использованной проволоки.

Области применения стальных, растительных и синтетических канатов в судовых устройствах приведены в [158, 201].

Сведения о видах якорных цепей, строение и типы судовых канатов даны в [183]. Классификация стальных канатов приведена также в Государственных стандартах.

Предлагаем следующую классификацию ГС, которые используются в МПС (табл. 3.1) [410]. Созданная классификация ГС, которые используются в МПС, вместе с другими классификациями позволяет лучше ориентироваться в ГС, используемых на флоте (в т. ч. ППС, ПБС). Созданная классификация ГС даёт возможность в дальнейшем использовать её при разработке математических моделей ГС МПС; разработке методики экспериментальных исследований МПС; разработке методов проектирования МПС в различных условиях и режимах эксплуатации; проведении теоретических и экспериментальных исследований динамики МПС;

исследовании прочности элементов МПС; разработке проектных рекомендаций для конструкторских расчетов элементов МПС.

Схема данной классификации приведена на рис. 3.1 [410].

Таблица 3.1. Классификация ГС МПС

№	Признак	Содержание
1.	по назначению	такелаж (стоячий, бегучий); буксир; швартовы; якорные канаты; тросы для грузоподъемных и спуско-подъёмных устройств; тросы для крепления предметов на суднее (корабле); кабель-трос ППС или ПБС, БПЛА и т.п.
2.	по конструкции	крученые; сплетенные; комбинированные; кабель-тросы
3.	по конструктивным особенностям	канаты одинарной (спиральной) свивки (1-, 2-, 3- и 4-слойные; по количеству слоёв — группа проволок, свитая винтообразно в один или несколько концентрических слоев); канаты двойной свивки (тросы); канаты тройной (кабельной) свивки; кабель-тросы
4.	по форме попереч-ного сечения	круглые; плоские
5.	по принципу изготовления	тросы прямого спуска; тросы обратного спуска (тросовой и кабельной работы)
6.	по условиям эксплуатации	легкие условия; средние условия; трудные условия
7.	по условиям плавучести	тонущие в воде; плавающие
8.	по условиям жёсткости	жёсткие (имеют один сердечник); гибкие (эластичные)
9.	по разрывному усилию	малопрочные (врем. сопр. разрыву от 140 кгс/мм^2 (1373·10^6 Па) до 200 кгс/мм^2 (1961·10^6 Па)); прочные; сверхпрочные
10.	по направлению свиваемых проволок	правой свивки (пряди направляются слева вверх и направо); левой свивки (направление прядей справа вверх налево)
11.	по виду свивки	крестовая (обыкновенная); односторонняя (параллельная); комбинированная (часть прядей расположена по крестовой, а часть по односторонней свивке через одну прядь)
12.	по виду сердечника	металлический (из одной или нескольких проволок); органический (хлопчатобумажный корд, пенька, манила, кокос, сизаль); синтетический (капрон), имеет один или несколько элементов

Окончание Таблицы 3.1

№	Признак	Содержание
13.	по числу прядей	однорядные (спиральные); 3-прядные; 6-прядные; 8-прядные; 18-прядные
14.	по виду конструкции поверхности	закрытой конструкции; полузакрытой конструкции
15.	по виду использования проволоки для наружных слоёв	круглая; фасонная; круглая и фасонная вместе
16.	по виду материала, из которого изготавливается	стальные (изготовленные из проволоки); маломагнитная сталь; неметаллические (органические или синтетические); комбинированные
17.	по массо-габаритным показателям	малой длины и массы (до 100 м); средней длины (до 500 м); большой длины (до 2500 м); сверхдлинные (свыше 2500 м)
18.	по типу гибкой связи	канат; грузонесущий трос; кабель; буксирно-кабельная часть; кабель-трос
19.	по способу удержания на глубине	для МПС; для ППС; для ПБС; в якорных устройствах (якорные мины, якорные устройства судов и НК, ПБУ); в швартовных устройствах (в т.ч. удержание на глубине); для дрейфующих систем (БНП)
20.	в зависимости от среды использования	в воздушной среде; в водной среде (пресная и морская вода); смешанная среда (воздушно-водная); в агрессивных средах (нефть, масло, щёлочи, кислоты)
21.	по глубине погружения (буксировки)	для малых глубин — до 600 м; для средних глубин — до 2000 м; для больших глубин — до 6000 м; для предельных глубин — до 12 000 м
22.	по условиям хранения	кратковременное (до 1 года); длительное (свыше 1 года)
23.	по экономическим показателям	невысокой стоимости (сравнительно недорогие); средней стоимости; высокой стоимости
24.	по скорости использования в МПС (ППС, ПБС)	малая (до 5 уз.); средняя (5–19 уз.); большая (свыше 20 уз.)

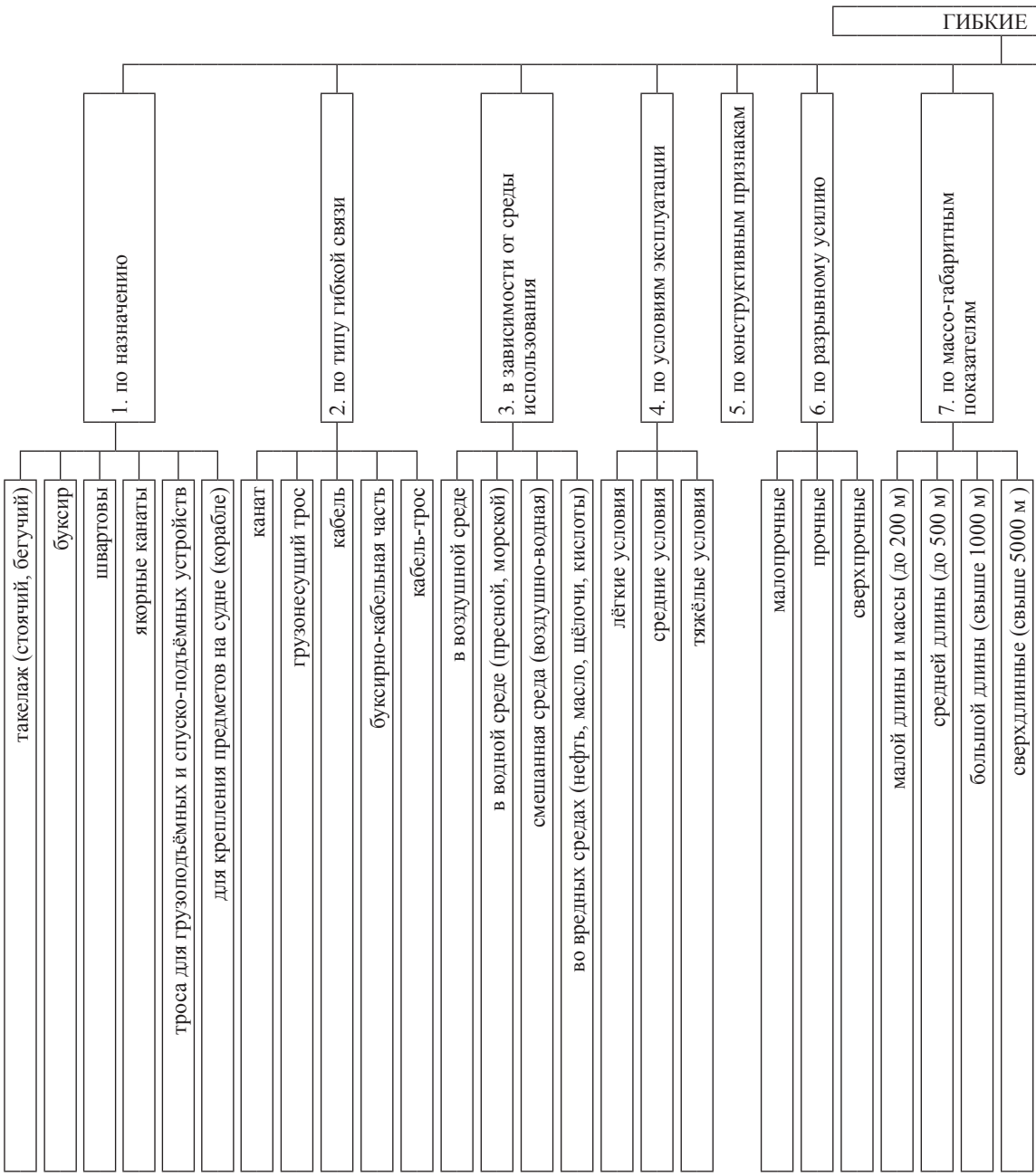
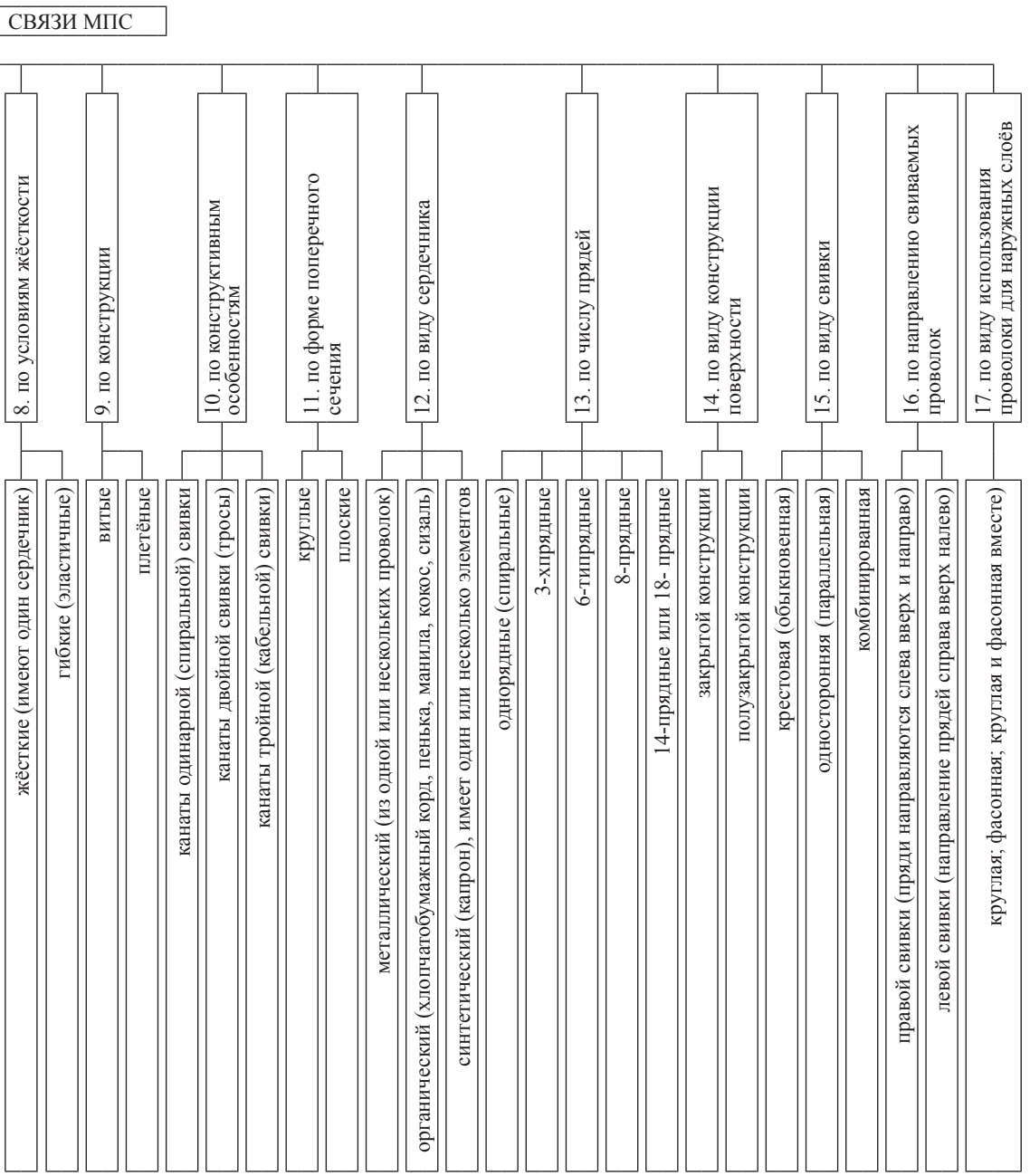


Рис. 3.1. Схема классификации


СВЯЗИ МПС
8. по условиям жёсткости
жёсткие (имеют один сердечник)
гибкие (эластичные)
9. по конструкции
витые
плетёные
10. по конструктивным особенностям
канаты одинарной (спиральной) свивки
канаты двойной свивки (тросы)
канаты тройной (кабельной) свивки
11. по форме поперечного сечения
круглые
плоские
12. по виду сердечника
металлический (из одной или нескольких проволок)
органический (хлопчатобумажный корд, пенька, манила, кокос, сизаль)
синтетический (капрон), имеет один или несколько элементов
13. по числу прядей
однорядные (спиральные)
3-хпрядные
6-типрядные
8-прядные
14-прядные или 18- прядные
14. по виду конструкции поверхности
закрытой конструкции
полузакрытой конструкции
15. по виду свивки
крестовая (обыкновенная)
односторонняя (параллельная)
комбинированная
16. по направлению свиваемых проволок
правой свивки (пряди направляются слева вверх и направо)
левой свивки (направление прядей справа вверх налево)
17. по виду использования проволоки для наружных слоёв
круглая; фасонная; круглая и фасонная вместе)

ГС МПС [387]

3.2. Силы, действующие на ГС в процессе эксплуатации МПС (на примере ПБС)

Вопросам, посвящённым рассмотрению сил, действующих на ГС МПС, посвящена обширная литература [11, 14, 16, 53, 136, 137, 145, 159, 161, 183].

С гибкими нитями, моделирующими гибкие связи и приобретающими во время работы форму пространственных кривых, сталкиваются при проектировании якорных устройств для глубоководной стоянки судов, подводных буксируемых систем, промысловых устройств и т. п. [201, с. 54].

Уравнение равновесия нити в натуральных координатах (на гибкую нить действует распределённая по её длине сила интенсивностью q, Н/м, с составляющими вдоль касательной к кривой q_t, главной нормали — q_n и бинормали q_b) (рис. 3.2) можно записать в следующем виде [201, с. 54]:

$$dT/ds = -q_t; \tag{3.1}$$

$$kT = T/R = q_n; \tag{3.2}$$

$$q_b = 0, \tag{3.3}$$

которые дополняет физическое соотношение однородной нити

$$\lambda = ds/dl = f(T). \tag{3.4}$$

В уравнениях (3.1)–(3.4) T — натяжение нити, Н; $R=1/k$ — радиус кривизны кривой; l — длина нити в её недеформированном состоянии; s — длина деформируемой растянутой нити. Равенство (3.3) означает, что под действием внешней нагрузки нить принимает всегда такую форму, при которой вектор нагрузки находится в соприкасающейся плоскости. Внешние нагрузки q_n, q_t, q_b изменяют своё положение в пространстве и значения вдоль нити.

В проекциях на прямоугольные декартовы координаты уравнения равновесия гибкой нити, воспринимающей распределённую нагрузку с составляющими $q_x \equiv X$, $q_y \equiv Y$, $q_z \equiv Z$, имеют вид [201, с. 56]:

$$\frac{d}{ds}\left(T\frac{dx}{ds}\right) = -X; \tag{3.5}$$

$$\frac{d}{ds}\left(T\frac{dy}{ds}\right) = -Y; \tag{3.6}$$

$$\frac{d}{ds}\left(T\frac{dz}{ds}\right) = -Z. \tag{3.7}$$

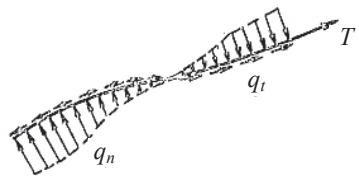


Рис. 3.2. Пространственная гибкая нить [197, с. 55]

Для замкнутости системы (3.5)–(3.7) к ней добавляется геометрическое соотношение

$$\left(\frac{dx}{ds}\right)^2+\left(\frac{dy}{ds}\right)^2=\left(\frac{dz}{ds}\right)^2=1. \tag{3.8}$$

и физическое соотношение (3.4).

Уравнения равновесия в натуральных координатах (3.1)–(3.3) просты и легко интегрируются, если силы q_t и q_n заданы в функции от длины дуги s. Но в большинстве задач внешние нагрузки задаются в зависимости от угла между касательной к кривой и некоторым направлением, например скорости потока жидкости. Кроме того, для определения координат концов нити требуется переход от натуральных величин $k(s)$ и $\chi(s)$ к величинам x, y, z. Поэтому определенные практические преимущества имеет запись уравнений равновесия в форме (3.5)–(3.7).

Для ГС якорных устройств, буксируемых носителей и тралов силу сопротивления воды задают в функции от углов набегания потока на нить, например от направляющих косинусов $dx/ds, dy/ds, dz/ds$. В таких случаях система (3.4)–(3.7) интегрируется в квадратурах.

Обозначив $dx/ds = u$ и $dy/ds = uw$, т. е.

$$w = dy/dx, \tag{3.9}$$

и представив $X = X(u,w), Y = Y(u,w), Z = Z(u,w)$, получим выражения для искомого натяжения нити, длины дуги в напряжённом s и начальном состояниях l, координат x, y, z:

$$T = C_1 \exp\int \frac{uX + uwY + (1-u^2-u^2w^2)^{1/2}Z}{-\Theta}du; \tag{3.10}$$

$$s = \int \frac{Tdu}{\Theta} + C_1; \tag{3.11}$$

$$l = \int \frac{Tdu}{f(T)\Theta} + C_1; \tag{3.12}$$

$$x = \int \frac{uTdu}{\Theta} + C_1; \tag{3.13}$$

$$y = \int \frac{uwTdu}{\Theta} + C_1; \tag{3.14}$$

$$z = \int \frac{T(1-u^2-u^2w^2)^{1/2}du}{\Theta} + C_1, \tag{3.15}$$

где $f(T)$ взято из физического соотношения (3.4);

$$\Theta(u,w) = -u(1-u^2)X + u^2wY + u(1-u^2-u^2w^2)^{1/2}Z. \tag{3.16}$$

Зависимость $w(u)$, необходимая для использования формул (3.9)–(3.16), определяется решением дифференциального уравнения:

$$\frac{dw}{du} = \frac{wX - Y}{\Theta(u,w)}. \tag{3.17}$$

Когда деформации гибкой связи описываются законом Гука, то $f = 1 + aT$; когда деформациями пренебрегают, $f = 1$ [201, с. 58].

Здесь же рассмотрена гибкая нить, нагруженная силами, зависящими только от угла α (квазистатические задачи обтекания канатов) [201]. Эти условия характерны для квазистатических задач обтекания канатов.

У плоской гибкой нити (рис. 3.3) кручение отсутствует, т. е. $x = 0$ [201].

Уравнения статики и физическое соотношение плоской нити удобно принимать в форме (3.1)–(3.4):

$$dT = -q_t ds; \tag{3.18}$$

$$T/R = q_n; \tag{3.19}$$

$$\lambda = ds/dl = f(T). \tag{3.20}$$

Если известны функции $q_n(\alpha)$ и $q_t(\alpha)$, подстановка геометрических соотношений:

$$ds = Rd\alpha;\ dz = ds\ sin\ \alpha;\ dx = ds\ cos\ \alpha, \tag{3.21}$$

вытекающих из рис. 3.3, *а*, в (3.18) и замена R в (3.21) на R из (3.19) приводят к дифференциальному уравнению $dT/T = -\left(q_t/q_n\right)d\alpha$, решаемому в квадратурах:

$$T = T_0 \exp\left(-\int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{q_t d\alpha}{q_n}\right). \tag{3.22}$$

Уравнение нити в параметрической форме

$$z = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{T\sin\alpha d\alpha}{q_n};\ x = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{T\cos\alpha d\alpha}{q_n}; \tag{3.23}$$

длина дуги

$$s = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{Td\alpha}{q_n}. \tag{3.24}$$

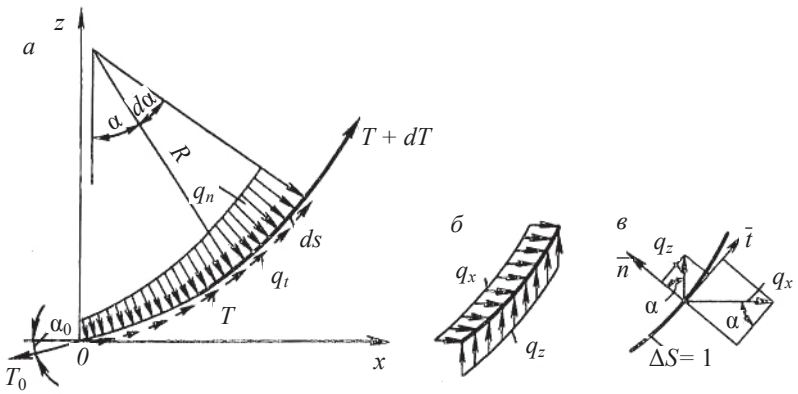


Рис. 3.3. Плоская гибкая нить

Численные методы расчета задач статики гибкой нити. Эти методы широко применяют в расчетах ГС судовых устройств, так как многие важные для практики задачи статики плоской нити не имеют аналитических решений [201, с. 65]. Даже получение квадратурных формул, подобных приведенным выше, часто не позволяет найти аналитическое решение задач статики плоской нити при конкретных граничных условиях, интегралы редко удается выразить в элементарных функциях. Вид расчетных алгоритмов зависит от типа задачи и способа задания внешних нагрузок q_n и q_t. Обозначив индексом «0» значения величин на левом конце нити и принимая его за начало координат, т.е. $x_0 = z_0 = l_0 = s_0 = 0$; для правого конца нити используем индекс «1» ($x_1, z_1, l_1, s_1, \alpha_1, T_1$) [201].

Задачи расчёта плоских нитей судовых устройств перечислены ниже [201]:

– заданы α_0, l_1, T_0, функции q_n, q_t; определяются $\alpha_1, x_1, z_1, s_1, T_1$, функции $z(x)$, $T(x)$ либо $T(l)$, $T(s)$; пример — расчёт каната буксируемого носителя;

– заданы x_1, z_1, l_1, функции q_n, q_t; определяются $\alpha_0, \alpha_1, s_1, T_0, T_1$, функции $z(x)$, $T(x)$; пример — расчёт закреплённого по двум концам провисающего каната;

– заданы z_1, l_1, T_{x1} (составляющая натяжения связи в точке *1* в направлении оси x), функции q_n, q_t; определяются $\alpha_0, \alpha_1, x_1, s_1, T_0, T_1$, функции $z(x)$, $T(x)$; пример — расчёт якорной цепи или каната;

– заданы α_0, z_1, T_{x1}, функции q_n, q_t; определяются $\alpha_1, x_1, l_1, s_1, T_0, T_1$, функции $z(x)$, $T(x)$; пример — расчёт якорной цепи, часть которой лежит на грунте, когда $\alpha_0 = 0$;

– заданы α_0, α_1, l_1, функции q_n, q_t; определяются x_1, z_1, s_1, T_0, T_1, функции $z(x)$, $T(x)$; пример — определение усилий, воспринимаемых якорным канатом, по замеренному углу выхода каната из клюза.

Из многих численных методов расчёта плоских гибких нитей используют два, наиболее простых и точных [201, с. 65]. Первый метод основан на представлении линии нити дугами окружностей с общими касательными. Нить разбивается на участки: первый *01*, второй *12* и т. п. (рис. 3.4), форма которых аппроксимируется дугами окружностей.

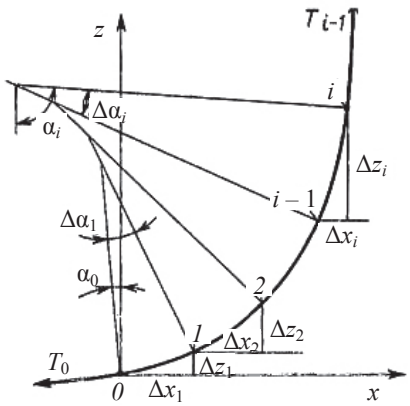


Рис. 3.4. Аппроксимация линии нити дугами окружностей [201, с. 65]

Второй метод основан на представлении нити ломаной линией с прямолинейными отрезками и нагрузкой в узлах, т.е. гибкая нить заменяется шарнирно сочленёнными стержнями. Этот приём широко используется в строительной механике, при расчётах буйрепов в потоке с переменным по глубине течением. В статике буйрепов исследуются гидродинамические нагрузки и их результирующие воздействия в стационарных условиях. Эти исследования позволяют определять форму (конфигурацию) троса в рабочем состоянии и характер распределения натяжений в нем [201, с. 32].

При анализе буйковых систем предполагается, что трос обладает идеальной гибкостью, т. е. он не передает изгибающих моментов. Буйковые системы, рассматриваемые в [11], обладают весьма элементарной схемой: плавучий буй, буйреп, якорь и, возможно, некоторые вспомогательные элементы. Однако даже для такой простейшей схемы аналитические решения оказываются многочисленными и сложными. Как и в других технических проблемах, достоверность этих решений зависит от степени соответствия между реальными условиями и сделанными допущениями. В этом отношении буйрепы отличаются рядом специфических факторов (конечной длиной, растяжимостью, отношением веса к сопротивлению воды), которые должны учитываться при выборе метода аналитического решения.

На рис. 3.5 представлена возможная классификация различных статических решений, применяемых на практике [11].

Например, для постоянных течений в [8] рассмотрены следующие допущения:

а) трос не растягивается при нагрузке (т. е. относительным удлинением можно пренебречь);

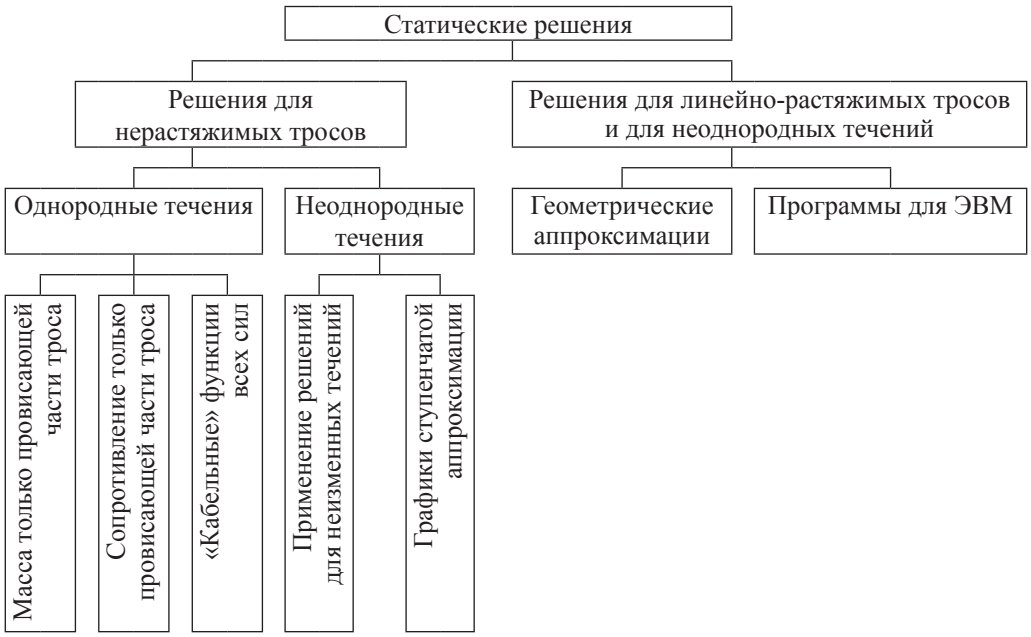


Рис. 3.5. Классификация статических решений [11]

б) направление течения не имеет вертикальной составляющей; кроме того, вектор течения и трос находятся в одной плоскости;

в) скорость течения постоянна (т. е. не меняется по глубине).

Действующие силы. При исследовании буйрепов, погруженных в воду (при условии неизменности течений), необходимо учитывать «гравитационные» силы (или силы плавучести), гидродинамическое сопротивление и натяжение троса.

«Гравитационные» силы могут действовать вверх или вниз; их направление определяется законом Архимеда. Плавучими элементами буйковых систем являются собственно буи и в некоторых случаях буйреп, не плавучими — стальные тросы и научная аппаратура. При слабых течениях буйреп уходит в глубину почти вертикально, причем сила натяжения в любой точке троса приблизительно равна весу в воде его и элементов оборудования ниже этой точки. В таком случае требуется небольшой якорь, а вес воды, вытесненной буем, плавающим на поверхности, будет примерно равен весу «подвешенной» части буйковой системы. В морских условиях, однако, обычно наблюдаются сильные течения. Поэтому к буйрепу прикладываются значительные силы сопротивления и трос приобретает новое положение равновесия. Натяжение, естественно, усиливается, так что здесь требуется гораздо более тяжелый якорь.

«Гравитационная» сила на единицу длины троса

$$P = W - B, \tag{3.25}$$

где W — вес единицы длины троса; B — вес воды, вытесненной единицей длины троса.

Гидродинамическое сопротивление. Сила сопротивления, вызванная потоком, обтекающим элементарный участок троса диаметром d и длиной ds (при его нормальном положении относительно направления потока, как показано на рис. 3.6), может быть вычислена по формуле

$$R\,dS = 0{,}5\rho C_{н} dV^2 dS, \tag{3.26}$$

где $C_{н}$ — коэффициент нормального сопротивления; V — скорость течения. Здесь: *а* — разложение скорости течения на составляющие; *б* — элементарный участок троса диаметром d и длиной ds; *в* — составляющие гидродинамической силы сопротивления (D — нормальная; F — касательная).

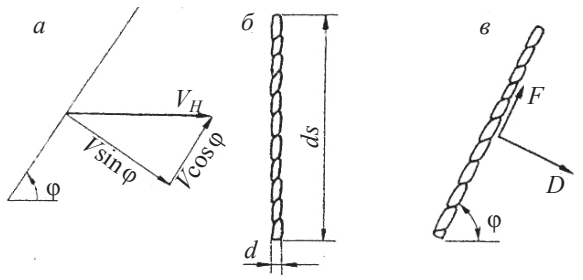


Рис. 3.6. Скорость течения, действующего на трос, и гидродинамическое сопротивление элементарного участка, расположенного под углом φ к направлению течения [11]

Сопротивление элементарного участка троса, расположенного под углом φ к направлению потока, слагается из двух составляющих — нормальной и касательной. Нормальная составляющая *DdS* вычисляется по формуле

$$Dds = 0{,}5\rho C_н d(V_н)^2 dS,$$

где $V_н = V\sin\varphi$ (нормальная составляющая скорости).

Подставляя значение $V_н$ в предыдущую формулу, получим

$$D = 0{,}5\rho C_н dV^2 \sin^2\varphi;$$

$$D = R\sin^2\varphi\,, \tag{3.27}$$

где *R* — сопротивление, вычисляемое по формуле (3.26).

Касательная составляющая Fds в свою очередь определяется как

$$FdS = 0{,}5\rho C_{кас}\,\pi\, dV^2_{кас}\cos^2\varphi\, dS, \tag{3.28}$$

где $C_{кас} = \gamma C_н$ — коэффициент касательного сопротивления; $(\pi d)\,ds$ — смоченная поверхность элементарного участка троса; $V_{кас} = V\cos\varphi$ — касательная составляющая скорости течения.

Таким образом, из (3.28) следует:

$$F = 0{,}5\rho\gamma C_н(\pi d)V^2\cos^2\varphi,$$

$$F = \pi\gamma R\cos^2\varphi. \tag{3.29}$$

Коэффициенты нормального и касательного сопротивления изменяются в зависимости от числа Рейнольдса и конструкции буйрепа. Для гладкого троса и чисел Рейнольдса Re ниже критического Re_{KP} коэффициент нормального сопротивления $C_н$ составляет 0,9–1,2. Для шероховатого или витого троса это значение возрастает до 1,4, если трос вибрирует от завихрений, то коэффициент нормального сопротивления достигает 1,8.

Уравнения статического равновесия. На рис. 3.7 показаны статические силы, действующие на элементарный участок троса длиной *ds* [11]. Здесь: натяжение *T;* изменение натяжения на элементарном участке *dT*; нормальная составляющая сопротивления *Dds*; касательное сопротивление трения *Fds*; сила тяжести элементарного участка *Pds* (φ — угол между осью троса и направлением течения *V*; *dφ* — изменение угла φ на длине *ds*; *ds* — длина элементарного участка троса).

В состоянии статического равновесия векторная сумма этих сил должна быть равна нулю. Распространяя это условие на нормальные и касательные составляющие указанных сил, получим (см. рис. 2.4 из [11]): для нормальных составляющих

$$(T + dT)\sin d\varphi - Dds - P\cos\varphi\, ds = 0.$$

Или для $\sin d\varphi \approx d\varphi$, $dT\,d\varphi \approx 0$:

$$T d\varphi = (D + P\cos\varphi)ds. \tag{3.30}$$

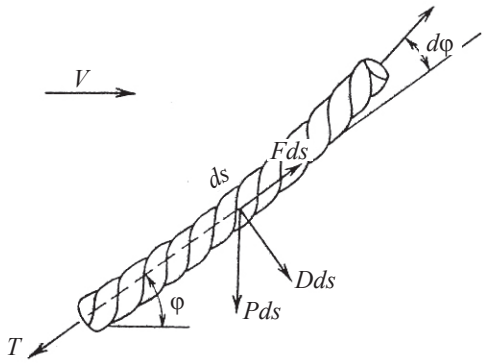


Рис. 3.7. Силы, действующие на элементарный участок троса *ds*

Для касательных составляющих

$$T + (T + dT)\cos d\varphi - Pds - P\sin\varphi\, ds + F\, ds = 0$$

или

$$dT = (P\sin\varphi - F)\, ds. \tag{3.31}$$

Интегрирование уравнений равновесия. Случай 1. Тяжелые и короткие тросы [11]. Рассмотрим короткий буйреп, изготовленный из тяжелого материала (цепи, стальной трос), с силой сопротивления, приложенной только к бую. В этом случае доминирует сила тяжести и членами, относящимися к сопротивлению троса в уравнении равновесия, можно пренебречь. Тогда имеем

$$P >> D \text{ и } F.$$

Уравнения (3.30) и (3.31) при этом условии преобразуются к виду

$$T\, d\varphi = P\cos\varphi\, ds; \tag{3.32}$$

$$dT = P\sin\varphi\, ds. \tag{3.33}$$

Поделим второе равенство на первое:

$$\frac{dT}{T} = \operatorname{tg}\varphi\, d\varphi.$$

Интегрируя это уравнение от $\varphi = 0$ до $\varphi = \varphi$, получим:

$$\lg\frac{T}{T_0} = \int_0^{\varphi} \operatorname{tg}\varphi\, d\varphi = \lg\sec\varphi.$$

или

$$T_{\text{гор}} = T\cos\varphi = T_0. \tag{3.34}$$

Здесь T_0 — натяжение у начала, где $\varphi = 0$ (рис. 3.8) [11].

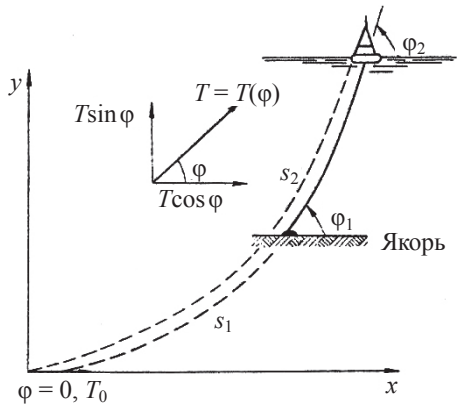


Рис. 3.8. Схема буйковой станции, удерживаемой тросом:
S_1 — воображаемая линия, продолжающая реальный трос до пересечения с осью x;
S_2 — условное положение троса от начала координат

Этот результат означает, что горизонтальная составляющая натяжения ($T_{гор}$) является постоянной. Подставляя (3.34) в (3.32), получим:

$$\frac{T_0 d\varphi}{\cos^2\varphi} = Pds.$$

Интегрируя это выражение при тех же граничных условиях, имеем

$$T_0 \operatorname{tg}\varphi = Ps \tag{3.35}$$

или

$$T_{верт} = T\sin\varphi = Ps. \tag{3.36}$$

Полученный результат показывает, что вертикальная составляющая натяжения ($T_{верт}$) равна весу погруженной в воду части держащего троса от начала до какой-либо точки $P(\varphi)$. Натяжение в этой точке равно:

$$T = (T_{2гор} + T_{2верт})^{1/2},$$

$$T = [T_{20} + (Ps)2]^{1/2}. \tag{3.37}$$

Координаты x и y любой точки $P(\varphi)$ на линии держащего троса определяются следующим образом:

$$x = \int dx = \int ds\cos\varphi.$$

Из уравнения (3.34) $\cos\varphi = T_0/T$.

Из уравнения (3.37)

$$\frac{T_0}{T} = \left[1 + \left(\frac{Ps}{T_0}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}.$$

Далее $dx = \dfrac{ds}{\sqrt{1 + \left(Ps/T_0\right)}}$.

Интегрируя, получим

$$x = \int_0^s dx = \frac{T_0}{P} arcsh\left(\frac{Ps}{T_0}\right). \tag{3.38}$$

Отсюда

$$s = \frac{T_0}{Psh\left(\frac{Px}{T_0}\right)}. \tag{3.39}$$

И наконец

$$\frac{dx}{dy} = \text{tg } \varphi.$$

Из формулы (3.35)

$$\text{tg } \varphi = \frac{Ps}{T_0}.$$

откуда

$$dy = \left(\frac{P}{T_0} s\right) dx.$$

Пользуясь формулой (3.39), получим

$$dy = sh\left(\frac{Px}{T_0}\right) dx.$$

После интегрирования

$$y = \int dy = \frac{T_0}{P}\left[ch\left(\frac{Px}{T_0}\right) - 1\right]. \tag{3.40}$$

Таким образом, координаты любой точки на буйрепе, как считает Г.О. Берто [11], можно вычислить по формулам (3.38) и (3.40), длину дуги от начала до этой точки — по формуле (3.39) и натяжение в ней — по формуле (3.37) [11]. Аналогичные выражения для троса, закрепленного не в начале, а в любой другой произвольной точке (см. рис. 3.8), могут быть получены по значениям, подсчитанным для концов троса (например, для участка $s = s_2 - s_1$).

Случай 2. Буйрепы с нулевой плавучестью [11]. У тросов сравнительно малой длины (обладающих нулевой плавучестью) силой тяжести и касательной составляющей сопротивления можно пренебречь. При этом условии формулы (3.30) и (3.31) можно переписать:

$$T\,\text{d}\varphi = D\,ds$$

или, пользуясь формулой (3.27),

$$T\,d\varphi = R \sin^2\varphi\, ds, \tag{3.41}$$

и

$$\frac{dT}{ds} = 0. \tag{3.42}$$

Из выражения (3.42) следует

$$T = T_0 = \text{const}. \tag{3.43}$$

Как утверждает Г. Берто [11], если известно натяжение в какой-либо точке троса, то его можно определить и для любой другой точки. Из формул (3.41) и (3.43) получаем:

$$ds = \frac{T_0 d\varphi}{R\sin^2\varphi}. \tag{3.44}$$

Горизонтальная и вертикальная проекции элементарного участка троса

$$dx = ds\cos\varphi = \frac{T_0\cos\varphi}{R\sin^2\varphi}d\varphi,$$

$$dy = ds\sin\varphi = \frac{T_0}{R}\frac{d\varphi}{\sin\varphi}. \tag{3.45}$$

Интегралы этих трех дифференциальных уравнений, вычисленные от одной точки $P_1(\varphi)$ до другой $P_2(\varphi)$, дают длину троса, а также горизонтальное и вертикальное расстояние между этими точками. В итоге имеем:

$$s = \frac{T_0}{R}(\text{ctg}\,\varphi_1 - \text{ctg}\,\varphi_2).$$

$$x = -\frac{T_0}{R}(\text{cosec}\,\varphi_2 - \text{cosec}\,\varphi_1). \tag{3.46}$$

$$e = \frac{T_0}{R}\left[\ln\left(\text{tg}\,\frac{\varphi_2}{2}\right) - \ln\left(\text{tg}\,\frac{\varphi_1}{2}\right)\right].$$

Случай III. Рассмотрение всех действующих сил (так называемые «кабельные» функции). Когда буйрепы имеют достаточно большую длину и, следовательно, гравитационные силы весьма существенны, необходимо учитывать все статические усилия. Однако в этом случае дифференциальные уравнения равновесия (3.30) и (3.31) не могут быть точно проинтегрированы и возникает необходимость в численном интегрировании. Результаты такого способа решения сводятся в таблицы.

В качестве примера в табл. 3.2 приведены описания статики ГС из некоторых литературных источников.

Таблица 3.2. Статика гибких связей

№ п/п	Тип гибкой связи	Описание	Источник	№№ страниц
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1.	Канаты и цепи	Статика пространственной гибкой нити	Судовые устройства / М. Н. Александров, Ю. Д. Жуков, Г. С. Киров, А. С. Симоненко, Ю. А. Смирнов, А. Е. Чумак : Учебник. — Л.: Судостроение, 1982. — 320 с.	с. 54–58
2.		Статика плоской нити (кручение отсутствует)		с. 58–71
3.		Гибкая нить в поле тяжести		с. 62–64
4.		Гибкая нить, нагруженная силами, зависящими только от угла **α** (квазистатические задачи обтекания канатов)		с. 64
5.		Гибкая связь, нагруженная нормальными силами		с. 64
6.		Численные методы расчёта задач статики гибкой нити (при отсутствии аналитического решения)		с. 65–68
7.		Расчёт пологих нитей и нитей под сосредоточенной нагрузкой		с. 68–71
8.		Расчёт ГС в потоке жидкости — пространственная задача		с. 75
9.		Расчёт плоской гибкой нити в потоке		с. 75–78
10.	Буйрепы плавучих буёв	Статика буйрепов	Берто Г. О. Океанографические буи: пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1979. — 215 с. («Техника освоения океана»)	С. 32
11.		Статика буйковых систем, поставленных на якорь в 1-й точке		с. 32
12.		Классификация статических решений		с. 33
13.		Уравнения статического равновесия		с. 37
14.		Интегрирование уравнений равновесия: случай 1 — тяжёлые и короткие тросы		с. 37–42
15.		Интегрирование уравнений равновесия: случай 2 — буйрепы с 0-й плавучестью		с. 42–44
16.		Интегрирование уравнений равновесия: случай 3 — рассмотрение всех действующих сил (кабельные функции)		с. 45

Окончание таблицы 3.2

№ п/п	Тип гибкой связи	Описание	Источник	№№ страниц
17.	Кабель-трос	Общие уравнения стационарных состояний кабель-троса	Блинцов В.С. Привязные подводные системы. — Киев: Наукова думка, 1998. — 218 с.	с. 43
18.		Способы решения уравнений стационарных состояний КТ		с. 46
19.	Гибкая нить	Обобщения задачи А.Н. Крылова о равновесии гибкой нити в потоке жидкости	Савин В.Г., Литвинов В.В. Некоторые обобщения задачи А.Н. Крылова о равновесии гибкой нити в потоке жидкости. — в кн: Стальные канаты. Сборник статей. Под ред. д.т.н. Глушко М.Ф. Т. 7. — К.: Изд. «Техника», 1970. — 372 с.	с. 343–345
20.	Рукава и канаты	Описание равновесного состояния рукавов и канатов в жидкости	Магула В.Э. Равновесие состояния рукавов и канатов в жидкости // Гибкие конструкции и связи. Сборн. научн. трудов НКИ. — Николаев, 1981. — 91 с.	с. 71–83
21.	Элементы механики гибких нитей	Задачи механики нитей в расчётах судовых устройств	Бугаенко Б.А., Магула В.Э. Специальные судовые устройства: Учебное пособие. — Л.: Судостроение, 1983. — 392 с.	с. 80–81
22.	Невесомый трос	Равновесие невесомого троса	Егоров В.И. Подводные буксируемые системы: Учебное пособие. — Л.: Судостроение, 1981. — 304 с.	с. 89–90
23.	Статика и установившееся движение гибкой нити	Описание установившегося движения гибкой нити	Алексеев Н.И. Статика и установившееся движение гибкой нити. — М.: Легкая индустрия, 1970. — 248 с.	

3.3. Уравнения динамики ГС в водной среде в условиях воздействия ветра и морского волнения

Как отмечал Г. Н. Савин [84], задача динамики проволочного каната может быть сведена к сравнительно несложной задаче математической физики, допускающей доведение решения до получения расчётных формул. Динамическая задача каната в такой постановке получила наибольшее развитие в трудах советских учёных А. Н. Динника, Г. Н. Савина, А. С. Локшина, Н. П. Нестерова, Ф. В. Флоринского, В. Д. Белого, О. А. Горошко и др. [84]. Следующим этапом развития динамической задачи каната являлась схема его расчёта как естественно закрученного стержня, позволяющая учесть не только главный вектор, но и главный момент в поперечном сечении каната.

В связи с увеличением рабочих глубин и расширением сфер использования МПС, как уже отмечалось, возникает актуальность совершенствования теории и методов проектирования гибких связей МПС, уточнения существующих методик расчётов. Это обусловлено тем, что существующие методы расчёта и проектирования либо являются упрощёнными и не учитывают действительные нагрузки и характер нагружения ГС МПС, или являются довольно сложными и громоздкими для конструкторов-проектантов и требуют значительных затрат времени для их выполнения. Идеализация каната сплошной упругой или упруго-вязкой нитью, или естественно закрученным стержнем даёт необходимые интегральные упругие его характеристики для построения динамического расчёта. Однако канат при этом всё же остаётся сплошным телом, и для определения напряжений в отдельных его проволоках необходимы дополнительные гипотезы о характере распределения деформаций в его поперечном сечении [84].

Авторы отмечают, что как и в теории упругости модель сплошной среды принципиально не дает истинных напряжений в реальных материалах, имеющих дискретную структуру, так и теория сплошного тела со всеми дополнительными гипотезами о характере распределения деформаций по поперечному сечению каната не дает действительной картины усилий в элементах каната. Требования к расчетам стального каната на прочность вынудили отказаться от гипотезы сплошности стального каната и предположений о характере распределения деформаций по его поперечному сечению и рассматривать расчет стального проволочного каната в дискретной схеме [84]. В такой постановке канат предстает как сложная система, поддающаяся расчету методами строительной механики стержневых систем. Но в отличие от обычных стержневых систем, рассматриваемых в строительной механике, канат обладает той существенной особенностью, что все его элементы взаимно контактируют по длине и благодаря этому работают совместно, сохраняя структурную целостность каната.

Многие исследователи отмечают, что аналитические методы сейчас нельзя считать достаточно алгоритмичными. Наиболее перспективным при этом считается применение численных методов. ГС, находящаяся в воде и являющаяся пространственным криволинейным объектом, до приложения нагрузки сохраняет

свою форму до тех пор, пока на него не начнут воздействовать какие-либо силы. При функционировании МПС примером таких воздействий могут служить усилия на ГС судов-буксировщиков, течений, ПА, аварийные режимы работы. При этом следует учитывать не только технические условия, но и механические нагрузки на ГС, которые возникают из-за влияния ветра, волнения моря, морских течений и маневров плавсредств.

Сложные и тяжелые режимы эксплуатации гибких элементов сопряжены, как правило, с необходимостью специального изучения и определения действующих на них сил, учета нелинейности разрешающих уравнений, возможности потери устойчивости равновесия и с требованием исследования поведения системы в закритических состояниях. Дифференциальные уравнения, описывающие их, имеют высокий порядок и содержат нелинейности сложного вида. Поиск их решения аналитически часто становится невозможным, что побуждает широко привлекать методы вычислительной математики. Решение таких задач оказывается возможным только современными методами нелинейного анализа, применение которых побуждает к выбору модификации разрешающих уравнений, обеспечивающих алгоритмичность и эффективность используемых подходов. До настоящего времени указанные исследования не получили необходимого развития из-за отсутствия достоверных математических моделей, которые достаточно просто и эффективно реализуются в виде алгоритмов и программ для численного решения рассматриваемых задач.

Задачи динамики. До сих пор практически не исследована динамика ГС — модели динамики применительно к конкретным схемам (новым задачам механики ГС) и конкретным возмущениям. Существующие расчёты ГС (математические модели), в том числе и проектные, используются в основном для идеальных круглых сечений. Однако в рамках проектных исследований необходимо учитывать изменение собственных характеристик ГС во время эксплуатации (изменение их характеристик во времени в течение длительной эксплуатации) [411]:

– при гидростатическом обжатии ГС меняет свою форму от идеальной окружности;

– происходит существенное растяжение ГС по длине, в том числе и внутренних жил кабелей, вследствие чего меняется сопротивление ГС;

– происходит неравномерное старение и износ оболочек и оплетки кабелей ГС, изготовленных из различных материалов;

– меняется характер внешних воздействий на ГС;

– изгибная жёсткость должна также моделироваться и учитываться в математических моделях;

– необходимо учитывать поперечную вибрацию ГС в потоке воды в квазистатической и локальной динамике, поскольку при классических методах расчётов она не учитывается.

В качестве примера в табл. 3.3 приведены описания динамики ГС из некоторых источников.

Таблица 3.3. Описание расчётов гибких связей (уравнения динамики)

№ п/п	Тип гибкой связи	Описание	Источник	№№ страниц
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1.	Канаты и цепи	Линейная плотность и прочность ГС	Судовые устройства / М.Н. Александров, Ю.Д. Жуков, Г.С. Киров, А.С. Симоненко, Ю.А. Смирнов, А.Е. Чумак : Учебник. — Л.: Судостроение, 1982. — 320 с.	С. 45–50
2.		Статика пространственной гибкой нити		С. 54–58
3.		Статика плоской нити (кручение отсутствует)		С. 58–71
4.		Гибкая нить в поле тяжести		С. 62–64
5.		Гибкая нить, нагруженная силами, зависящими только от угла α (квазистатические задачи обтекания канатов)		С. 64
6.		Гибкая связь, нагруженная нормальными силами		С. 64
7.		Численные методы расчёта задач статики гибкой нити (при отсутствии аналитического решения)		С. 65–68
8.		Расчёт пологих нитей и нитей под сосредоточенной нагрузкой		С. 68–71
9.		Расчёт ГС в потоке жидкости — пространственная задача		С. 75
10.		Расчёт плоской гибкой нити в потоке		С. 75–78
11.	Буйрепы плавучих буёв	Статика буйрепов	Берто Г.О. Океанографические буи: пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1979. — 215 с. («Техника освоения океана»)	С. 32
12.		Статика буйковых систем, поставленных на якорь в 1-й точке		С. 32
13.		Классификация статических решений		С. 33
14.		Уравнения статического равновесия		С. 37
15.		Интегрирование уравнений равновесия: случай 1 — тяжёлые и короткие тросы		С. 37–42
16.		Интегрирование уравнений равновесия: случай 2 — буйрепы с 0-й плавучестью		С. 42–44
17.		Интегрирование уравнений равновесия: случай 3 — рассмотрение всех действующих сил (кабельные функции)		С. 45
18.		Статика многоякорных буйковых станций: силы, действующие на трос		С. 76
19.		Статика многоякорных буйковых станций: вес троса в воде		С. 76
20.		Статика многоякорных буйковых станций: касательная и нормальная составляющие гидродинамического сопротивления		С. 77
21.		Статика многоякорных буйковых станций: уравнения равновесия		С. 79

Продолжение таблицы 3.3

1	*2*	*3*	*4*	*5*
21.		Статика многоякорных буйковых станций: уравнения равновесия		С. 79
22.		Динамика буйрепов: буйреп как механическая система с распределенными параметрами		С. 80
23.		Динамика буйрепов: особые случаи — трос с грузом на нижнем конце		С. 87
24.		Буйреп как многомассовая механическая система		С. 94
25.		Буйреп как многомассовая механическая система: система с 2-мя степенями свободы		С. 95–96
26.		Буйреп как многомассовая механическая система: системы с несколькими степенями свободы		С. 103
27.		Буйреп как многомассовая механическая система: линейное демпфирование		С. 103
28.		Буйреп как многомассовая механическая система: нелинейное демпфирование		С. 107
29.	Гибкие связи буксируемых систем	Равновесие троса при движении в воде: гидродинамические силы, действующие на элементарный отрезок троса, обтекаемый потоком жидкости	Егоров В.И. Подводные буксируемые системы: Учебное пособие. — Л.: Судостроение, 1981. — 304 с.	С. 66
30.		Пространственная задача о равновесии тяжёлого троса при движении в воде		С. 72
31.		Задача о равновесии невесомого троса с учётом только нормальной составляющей полной гидродинамической силы		С. 89
32.		Плоская задача о равновесии троса с учётом касательной составляющей полной гидродинамической силы		С. 91
33.		Катенарная кривая		С. 95
34.	Удобообтекаемые тросы и грузонесущие кабели буксируемых систем	Гидродинамические характеристики удобообтекаемых тросов и расчёт равновесия их при движении. Кавитация удобообтекаемых тросов		С. 100
35.	Буксирные тросы	Задача о равновесии буксирного троса без обтекателей с учётом его веса и боковых гидродинамических сил		С. 247
36.	Буйрепы	Определение натяжения и длины оттяжки глубины буя, буксируемого по поверхности воды		С. 252

Продолжение таблицы 3.3

1	*2*	*3*	*4*	*5*
37.	Динамика движения подводных буксируемых систем	Натяжение буксира и его зависимость от перемещений и скорости движения ходового конца буксира относительно коренного	Иконников И.Б., Гаврилов В.М. и др. Подводные буксируемые системы и буи нейтральной плавучести. — СПб.: Судостроение, 1992. — 224 с. (Серия «Техника освоения океана»)	С. 58
38.		Канаты в потоке жидкости		С. 93
39.	Спуско-подъёмные устройства	Вертикальные перемещения и натяжения в кабель-тросе при колебаниях контейнера в толще воды		С. 199
40.		Отрыв груза от дна		С. 208
41.	Устройства для буксировки контейнеров с научной аппаратурой	Натяжение в кабель-буксире на ходу судна		С. 212
42.	Методы расчета устройств передачи грузов	Определение натяжения в канатах и траектории движения груза в устройствах траверзной передачи грузов		С. 258
43.	Проектний розрахунок зусиль у КТ	Постановка задачі	Блінцов В.С., Магула В.Є. Проектний розрахунок зусиль у кабель-тросі прив'язної підводної системи: Навчальний посібник. — Миколаїв: УДМТУ, 1998. — 43 с.	С. 29
44.		Основні теоретичні залежності		С. 31
45.		Порядок проектного розрахунку зусиль у КТ ППС		С. 36
46.		Приклад розрахунку зусиль у кабель-тросі		С. 36
47.	Проектирование ППС	Общие уравнения стационарных состояний кабель-троса	Блинцов В.С. Привязные подводные системы.— Киев: Наукова думка, 1998. — 218 с.	С. 43
48.		Способы решения уравнений стационарных состояний КТ		С. 46
49.	Математические модели и методы расчетов параметров поведения в потоке устройств для буксировки аппаратуры	Трос как система с распределенными параметрами	Динамика подводных буксируемых систем / Поддубный В.И., Шамарин Ю.Е., Черненко Д.А., Астахов Л.С. — СПб: Судостроение, 1995. — 200 с.	С. 63
50.		Дискретные аппроксимации тросовых систем в потоках		С. 64
51.		Конечно-разностные аппроксимации		С. 69
52.		Метод конечных элементов		С. 72
53.		Метод Галеркина		С. 73
54.		Дискретная модель нити в потоке		С. 76

Продолжение таблицы 3.3

1	*2*	*3*	*4*	*5*
55.	Математическая модель динамики привязной подводной системы	Системы координат для гибкой связи	Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики / Виноградов Н.И., Гутман М.Л., Лев И.Г., Нисевич М.З.— СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2000. — 324 с.	С. 16
56.		Учет влияния гибкой связи на динамику подводного аппарата		С. 30
57.		Модель динамики гибких связей. Уравнения динамики гибких связей		С. 31
58.		Гидродинамические нагрузки на гибкие связи		С. 35
59.		Плохообтекаемые гибкие связи. Удобообтекаемые гибкие связи		С. 37
60.		Об учете гидростатической нагрузки на гибкие связи		С. 46
61.		Граничные условия		С. 47
62.	Пространственное равновесие гибкой связи при прямолинейном движении	Равновесие гибкой связи		С. 63
63.		Оптимизация распределения заглубляющей нагрузки по длине гибкой связи вблизи свободной поверхности воды		С. 79
64.		Равновесие гибкой связи при циркуляции		С. 109
65.		О критических углах равновесия гибких связей		С. 116
66.	Задачи динамики ППС	Нелинейная постановка задачи динамики привязных подводных систем. Модель 1. Нерастяжимая безынерционная гибкая связь		С. 120–124
67.		Модель 2. Нерастяжимая гибкая связь		С. 132
68.		Модель 3. Упругая гибкая связь		С. 132
69.		Модель привязной подводной системы в целом		С. 135
70.		Линейная постановка задачи динамики привязной подводной системы		С. 137
71.		Метод определения производных натяжения гибкой связи на основе уравнений равновесия в потоке		С. 143
72.		Линейная модель динамики гибкой связи как системы с распределенными параметрами		С. 149
73.		Определение ЧХ гибкой связи для бокового движения. О некоторых общих динамических свойствах гибких связей. Выражение производных от натяжения через ЧХ гибкой связи		С. 156

Окончание таблицы 3.3

1	*2*	*3*	*4*	*5*
74.	Задачи гидроупругости ППС	Определение равновесия гибкой связи с учетом ее жесткости на изгиб		С. 236
75.		О воздействии кручения гибких связей на движение привязных подводных систем		С. 240
76.		Проблема образования петель («колышек») в гибких связях		С. 249
77.		О вибрации плохообтекаемых гибких связей в потоке. Обзор известных экспериментальных данных		С. 254
78.		Полуэмпирическая модель гидроупругой вибрации гибких связей		С. 258
79.		Гидроупругая устойчивость удобообтекаемых гибких связей		С. 270
80.		Коэффициенты сопротивления плохообтекаемых гибких связей. Определение гидродинамических характеристик углубляющего аппарата. Определение коэффициента сопротивления удобообтекаемой гибкой связи		С. 285
81.	Канаты якорного устройства	Оптимизационная задача об определении параметров каната якорного устройства транспортного судна (Дыхта Л.М.)	Гидродинамика корабля: Сборник научных трудов. — Николаев, НКИ, 1992 — 113 с.	С. 3–10
82.	Рукава и канаты в жидкости	Равновесные состояния рукавов и канатов в жидкости (Магула В.Э.)		С. 71–82
83.	Бурильные колонны	О динамическом равновесии бурильной колонны в неоднородном потоке жидкости (Скрипник Ю.А.)		С. 30–36

Несмотря на функциональное и конструктивное разнообразие современных ППС, их создатели сталкиваются с рядом сходных проблем и нуждаются в разработке общих подходов к их разрешению. В частности, к таким проблемам относятся проблемы гидродинамики. При создании движущихся под водой привязных систем и аппаратов изучение вопросов их динамики, силового воздействия среды и судна-носителя, вопросы управления и стабильности движения являются первостепенными и во многом определяют возможность нормального функционирования аппаратуры, установленной на них. При этом наиболее существенной особенностью динамики ППС, усложняющей ее по сравнению с известной теорией движения в жидкости и газе автономных твердых тел (самолетов, подводных и надводных судов и т.п.), является необходимость учета влияния ГС как системы с распределенными параметрами, также взаимодействующей с потоком жидкости. Как считает В.С. Блинцов [14], расчёты для кабель-тросов хорошо разработаны для тросов с неизменным диаметром и нулевой плавучестью; расчёт специальных кабель-тросов, имеющих различные диаметры (уменьшается от коренного конца к ходовому), практически не разработан.

Методы математического описания ППС. Теория ППС, изучающая механику их движения, отличается от теории динамики таких свободно движущихся подводных устройств, как подводные лодки, торпеды или автономные ПА, которым посвящено множество работ как у нас в стране, так и за рубежом, прежде всего тем, что требует учета свойств ГС.

С точки зрения механики ППС представляет собой систему, объединяющую два разнородных объекта: ПА, который может рассматриваться как абсолютно жесткое тело, и ГС — систему с распределенными параметрами [127]. Если динамика первого объекта математически может быть описана системой обыкновенных дифференциальных уравнений, то динамика второго — только системой уравнений в частных производных, для которой система, описывающая динамику аппарата, должна служить граничными условиями на концах ГС.

Поэтому математическая модель в общем случае включает:

– математическую модель ГС;

– математические модели тел, сопрягающихся с ГС на ее концах (например, судна-буксировщика на коренном конце ГС и буксируемого ПА на ходовом);

– уравнения, описывающие динамику тел как граничные условия для ГС. Ниже описаны используемые системы координат и математические модели динамики привязных ПА и ГС.

Гидродинамические силы, действующие на ГС. При рассмотрении задачи о равновесии троса при движении в воде весьма существенное значение имеет правильное представление о возникающих при этом гидродинамических силах, их физической сущности и зависимости этих сил от положения троса по отношению к направлению движения [176]. Пусть мы имеем некоторый элементарный отрезок троса OO_1 длиной Δl, растягиваемый двумя приложенными на его оси силами T и T_1 и обтекаемый потоком жидкости (рис. 3.9).

Примем за начало координат начальную точку отрезка троса *o* и проведем скоростную систему осей координат [176, с. 67]. Ось *ox* направим по направлению движения троса. Ось *oy* расположим в плоскости, проходящей через ось *ox* и отрезок троса. Ось *oz* проведем перпендикулярно к плоскости *xy*.

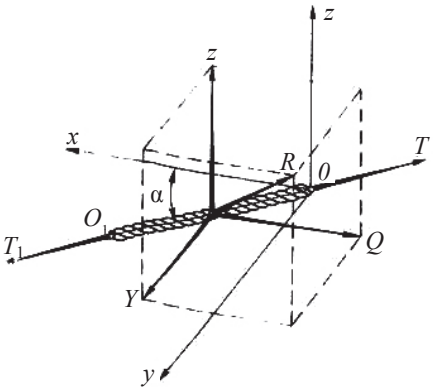


Рис. 3.9. Гидродинамические силы, действующие на элементарный отрезок троса

Предполагая, что трос является абсолютно гибким, отрезок троса OO_1 можем считать прямолинейным. Обозначим угол, составляемый отрезком троса с осью *ox* (угол атаки), через α. Принимая во внимание симметрию отрезка троса, будем считать, что точка приложения действующей на него полной гидродинамической силы *R* находится в середине отрезка. Поскольку в данной задаче нас интересуют только гидродинамические силы, массу отрезка троса рассматривать не будем. Разложим полную гидродинамическую силу *R* на составляющие по осям координат.

Лобовое сопротивление, подъемная (углубляющая) сила и боковая сила отрезка троса могут быть выражены обычными формулами гидромеханики

$$Q = c_x \rho/2\, d\, \Delta l\, v^2; \tag{3.47}$$

$$Y = c_y \rho/2\, d\, \Delta l\, v^2; \tag{3.48}$$

$$Z = c_z \rho/2\, d\, \Delta l\, v^2. \tag{3.49}$$

Поскольку диаметр троса, длина отрезка и скорость его движения известны, то для определения составляющих полной гидродинамической силы, а следовательно, величины и направления последней необходимо знать значения гидродинамических коэффициентов c_y, c_x и c_z при любом угле атаки троса. Рассмотрим отрезок троса oo_x в плоскости *xy* (рис. 3.10) [176].

Разложим скорость *v* набегающего потока жидкости на две составляющие — перпендикулярную и параллельную отрезку троса. Составляющая скорости, перпендикулярная отрезку троса,

$$v_n = v \sin \alpha. \tag{3.50}$$

Составляющая скорости, параллельная отрезку троса,

$$v_t = v \cos \alpha. \tag{3.51}$$

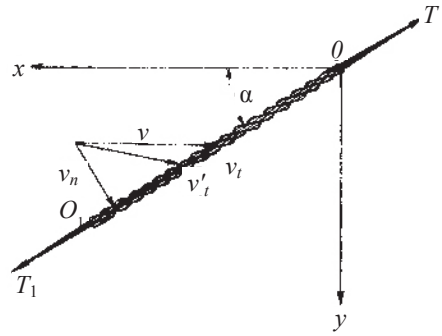


Рис. 3.10. Разложение скорости потока, обтекающего элементарный отрезок троса, на нормальную и касательную составляющие

Будем считать, что отрезок троса обтекается жидкостью в двух направлениях —

нормальном и касательном, в соответствии с чем на отрезок троса будут действовать нормальная составляющая полной гидродинамической силы Y_1 и касательная составляющая Q_1. Допустимость представленной физической картины обтекания отрезка троса жидкостью подтверждается следующим экспериментом. При обтекании троса частицы жидкости в направлении касательной скорости v_t' движутся по канавкам между прядями троса и, кроме того, их движение тормозится в результате действия сил трения. Отсюда следует, что линейная скорость v_t' потока вдоль троса будет меньше скорости v_t, получаемой в результате геометрического разложения скорости потока v. Следовательно, при обтекании троса должен появиться скос потока (рис. 3.11) [176, с. 68].

Правильность представленной физической картины обтекания отрезка троса подтверждается еще и таким фактом. Вследствие того, что трос не является гладким цилиндром, но пряди его располагаются по винтовой линии, частицы жидкости, двигающиеся вдоль троса, проходя по винтовым канавкам, образуемым прядями, приобретают помимо поступательной скорости еще и окружную скорость u. Направление этой скорости зависит от направления свивки троса [176, с. 67].

Вследствие наличия окружной скорости u создается циркуляция скорости Γ. Циркуляция скорости и скорость v нормального обтекания отрезка троса вызовет появление поперечной силы Z, нормальной к плоскости xy, направление которой будет зависеть от направления окружной скорости u.

Обозначим коэффициент сопротивления при перпендикулярном обтекании троса c_{x90} и коэффициент сопротивления троса при параллельном обтекании c_{x0}. Тогда нормальная составляющая полной гидродинамической силы, действующей на отрезок троса, будет равна

$$Y_1 = c_{x90}\,\rho/2\; d\,\Delta l\; v_n^2, \tag{3.52}$$

а касательная составляющая этой силы

$$Q_1 = c_{x0}\,\rho/2\; d\,\Delta l\; v_t^2. \tag{3.53}$$

Спроецируем нормальную и касательную силы Y_1 и Q_1 на оси ox и oy. Тогда будем иметь лобовое сопротивление Q и подъёмную силу Y.

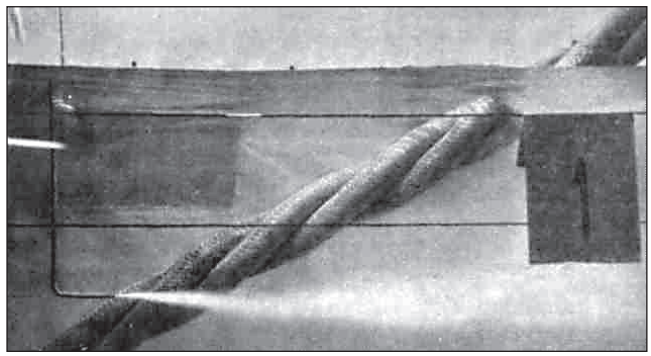


Рис. 3.11. Испытание троса в гидродинамическом лотке: скос потока ясно проявляется

$$Q = Y_1 \sin\alpha + Q_1 \cos\alpha,$$

$$Y = Y_1 \cos\alpha - Q_1 \sin\alpha.$$

Подставим вместо Y_1 и Q_1 их значения по формулам (3.52) и (3.53):

$$Q = c_{x90}\, \rho/2\, d\, \Delta l\, v_n^2 \sin\alpha + c_{x0}\, \rho/2\, d\, \Delta l\, v_t^2 \cos\alpha,$$

$$Y = c_{x90}\, \rho/2\, d\, \Delta l\, v_n^2 \cos\alpha - c_{x0}\, \rho/2\, d\, \Delta l\, v_t^2 \sin\alpha.$$

Заменим v_n и v_t их значениями по формулам (3.49) и (3.50) и приравняем правые части полученных уравнений к правым частям уравнений (3.47) и (3.48). После сокращения на ($\rho/2\, d\, \Delta l\, v^2$) получаем:

$$c_{\text{ч}} = c_{x90} \sin^3\alpha + c_{x0} \cos^3\alpha,$$

$$c_{\text{у}} = c_{x90} \sin^2\alpha \cos\alpha - c_{x0} \cos^2\alpha \sin\alpha.$$

В [176, с. 68] выводится формула для определения коэффициента третьей составляющей полной гидродинамической силы — c_z. Окружная скорость u прямо пропорциональна касательной скорости v_t. Тогда циркуляцию вследствие наличия окружной скорости можно выразить такой формулой:

$$\Gamma = k\pi dv,$$

где k — некоторый коэффициент, знак которого зависит от направления свивки троса, а величина — от конструкции троса (главным образом, от числа прядей) и скорости обтекания v троса.

Чем меньше число прядей в тросе, тем относительно глубже канавки между прядями и тем большее количество частиц жидкости будет двигаться по канавкам, а следовательно, тем интенсивнее циркуляция Г. В связи с этим значение коэффициента k для трехпрядного троса будет большим, чем для шестипрядного и особенно для многорядного троса. При гладком цилиндре, который можно уподобить тросу с бесконечным количеством прядей, коэффициент k равен нулю, а следовательно, равна нулю и циркуляция Г. Чем больше скорость обтекания v, тем больше при неизменном угле атаки и касательная составляющая скорости v_t. Однако чем больше величина v_h, тем меньше должен быть коэффициент k, так как частицы жидкости при значительной скорости касательного обтекания троса, обладая большой кинетической энергией, станут проскакивать через канавки, и в образовании циркуляции будет участвовать меньшее количество частиц жидкости. Следовательно, коэффициент k обратно пропорционален скорости обтекания троса v.

В то же время при неизменной скорости v скорость v_t будет тем менше, чем больше угол атаки, а следовательно, и нормальная составляющая v_n. В связи с этим коэффициент k будет прямо пропорционален скорости v_n.

Увеличение сопротивления тросов при буксировке их в воде (при значительных длинах тросов) можно объяснить возникновением вибрации. Вибрация в большей степени влияет на сопротивление формы ввиду того, что при этом как бы увеличивается диаметр троса, и в меньшей — на увеличение сопротивления трения [176].

В результате натурного эксперимента В.И. Егоровым установлено [176, с. 71], что как для трехпрядного, так и для шестипрядного троса практически при всех диаметрах тросов, применяемых в буксируемых системах, можно принять $c_{x90} = 1{,}7...1{,}9$ и $c_{x0} = 0{,}02...0{,}025$.

Следует отметить, что приведенные значения c_{x90} соответствуют некоторой средней длине элемента тросовой части буксируемых систем и некоторой средней скорости ее буксировки. При других длинах и других скоростях значения коэффициента могут быть и несколько иными.

Как показывают данные продувки тросов и результаты морских испытаний, коэффициент c_z в большой степени зависит от конструкции троса и, в частности, от числа его прядей [176]. Естественно, что от числа прядей троса должен зависеть и коэффициент ε. Исходя из физической картины возникновения боковой силы, не следует ожидать значительного влияния вибраций троса на величину ε. В связи с этим она с достаточной точностью может быть определена по данным испытаний тросов в аэродинамической лаборатории.

3.4. Классификация математических моделей

Ранее, до развития методов математического моделирования широко использовалось физическое моделирование, которое не потеряло своего значения и в настоящее время. Физическое моделирование широко применялось до недавнего времени при создании сложных технических объектов. Обычно изготавливался макетный или опытный образец технического объекта, проводились испытания, в процессе которых определялись его выходные параметры и характеристики, оценивались надежность функционирования и степень выполнения технических требований, предъявляемых к объекту. Если вариант технической разработки оказывался неудачным, все повторялось сначала, т. е. осуществлялось повторное проектирование, изготовление опытного образца, испытания и т.д. [187].

В современном понимании модель (от лат. modus — копия, образ, очертание) — это особого рода промежуточный предмет исследования, построенный из материальных или идеальных (воображаемых) элементов, находящихся в определенном соответствии с самим познаваемым объектом и способный замещать объект на некоторых этапах познания [207]. Моделирование имеет огромное значение при проведении научных исследований. Ещё А. Эйнштейн сказал: модели должны быть «настолько простыми, насколько это возможно, но не проще» [181, с. 12].

«Модель — это своего рода абстракция, промежуточное звено между теоретическим абстрактным мышлением и объективной действительностью... — отмечает В.С. Немчинов [342, с. 214]. — Исследователь может прибегнуть к методу построения модели, идя от наблюдения, от практики к теории, а также идя обратно — от абстрактных теоретических соображений к конкретной реальной действительности. В процессе научного исследования модель может работать также в двух направлениях: от наблюдения реального мира к теории и обратно. Таким образом, построение модели, с одной стороны, — важная ступень к созданию тео-

рии, а с другой — одно из средств экспериментального исследования. Однако никакая модель не может заменить строгой научной теории» [26, с. 32].

Модели представляют собой продукты материального или идеального воспроизводства возможных и реальных процессов отношений и функций субъектом познания с помощью аналогий (гомологий) или с помощью использования таких аналогий (гомологий) в других материальных и идеальных системах. Тем самым мы выражаем несогласие с ограничением роли модели в познании и подчеркиваем значение метода моделей во всех науках [21, с. 8].

Моделирование — это особый вид эксперимента, проводимого не на реальном объекте, а на некотором его аналоге, т. е. на модели, которая является одновременно и средством, и объектом экспериментального исследования, заменяющим изучаемый объект. Особенно большое значение оно имеет для исследования объектов и процессов, прямой эксперимент над которыми затруднен или вообще невозможен. К ним относятся многие сложные процессы, связанные с созданием новых систем вооружения и ведением боевых действий. Моделирование позволяет получить опыт, делать ошибки и исправлять их, не неся при этом реальных материальных и моральных издержек. Оно дает возможность производить проверку предлагаемых модификаций систем или процессов, изучать организацию и структуру систем в динамике еще до реального воплощения в жизнь, имитировать события прошлого, настоящего и возможного будущего, а также действия сил в тех процессах, осуществить которые в военной области фактически в мирное время нельзя [129].

На практике при моделировании часто не удается выполнить все условия подобия; такое моделирование называют приближенным. В некоторых случаях отдельные критерии подобия не оказывают существенного влияния на количественные значения изучаемых параметров, и поэтому для упрощения модели их можно исключить. При приближенном моделировании можно рекомендовать следующее: используя теорию подобия, находят необходимые и достаточные критерии подобия; исходя из целей исследования, устанавливают критерии подобия, которые имеют определяющее влияние на изучаемые параметры; при переносе результатов с модели на натуру необходимо учитывать приближенность моделирования [42, с. 90].

Целью моделирования является построение научной теории, критерием истинности которой служит общественно-историческая производственная практика человечества в целом [111]. В теоретическом познании основными этапами моделирования являются:

а) построение модели в виде образа объекта (здесь существенна роль аналогии);

б) исследование построенной модели (здесь существенна роль абстракции) и ее объективности;

в) экстраполяция информации (на познаваемые объекты);

г) практическая проверка экстраполяции.

В современном естествознании имеются две существенные тенденции в развитии моделирования [111]:

– понятие модели трактуется не как наглядная механическая система, а как абстрактная логико-математическая структура;

– на смену модели-аналогии приходит модель-гипотеза, являющаяся предварительной формой объяснения новых явлений.

Метод исследования сложных агрегатов или процессов на их моделях или на реальных установках с применением методов теории подобия при постановке и обработке эксперимента называется *моделированием.* Под моделью понимают устройство, воспроизводящее строение и действие какого-либо другого «настоящего» устройства [42, 203, 367].

Моделирование решает две основные задачи: выбор типа (вида) модели и установление ее параметров; перенос результатов, полученных при изучении модели на натуру. Теоретической основой моделирования являются теории размерностей и подобия, которые определяют необходимые и достаточные условия явлений [148]. Теория подобия стала научной основой обобщения данных физико-технических испытаний, теорией эксперимента, указывающей во всех случаях, когда решение дифференциальных уравнений физики наталкивается на трудности, путь к такой постановке опытов, что их результаты могут быть распространены на всю область изучаемых явлений.

Моделирование стало мощным средством для обнаружения различных недостатков в технических устройствах и для изыскания путей к их устранению. Оно широко применяется для проверки вновь конструируемых объектов, так что до их выполнения, в процессе проектирования, оно позволяет совершенствовать новые, еще не опробованные на практике конструкции.

Моделирование находит применение как метод познания, исследования и расчета при решении вопросов строительства гидротехнических сооружений, высотных зданий, мостов, конструкций кораблей, самолетов и ряда новых машин, серийный выпуск которых требует предварительного изучения ранее созданных образцов и экспериментирования с новыми образцами [162, с. 3]. Из всего многообразия моделей в механике твердого деформируемого тела используют в основном два вида — физические и математические.

Физическое моделирование позволяет установить границы применимости различных теоретических решений, проанализировать влияние разных факторов на поведение системы и получить исходные данные для математического описания явления [187, с. 89–90]. Физическое моделирование сложных технических систем сопряжено с большими временными и материальными затратами.

Абстрактное моделирование связано с построением абстрактной модели [162, с. 8]. Такая модель представляет собой математические соотношения, графы, схемы, диаграммы и т.п. Наиболее мощным и универсальным методом абстрактного моделирования является математическое моделирование. Оно широко используется как в научных исследованиях, так и при проектировании.

Физическая модель представляет собой геометрически подобную копию исследуемого объекта, имеющую ту же физическую природу. Модель может отличаться от натуры материалом, геометрическими размерами, значением и характером действующих усилий, скоростью протекания процессов и т. д.

Как известно, исторически преходящий относительный характер практики, любого эксперимента состоит в том, что экспериментальные данные не могут полностью, абсолютно точно и глубоко доказать адекватность той или иной модели, гипотезы. Как отмечают В.С. Тюхтин и С.Н. Вовк в [366, с. 75], принятие какой-то определенной модели на основе тех или иных экспериментов не отменяет того, что результаты данных наблюдений в принципе могут не противоречить и множеству других возможных моделей. Приближение к наиболее правдоподобной, «более истинной» модели может быть достигнуто путем выбора, или предпочтения, одной из нескольких конкурирующих моделей. Эта задача влечет постановку и планирование так называемых дискриминирующих экспериментов [366]. При этом результаты измерений, естественно, не должны быть инвариантны относительно замены одной из конкурирующих моделей другой. Выбор предпочтительной модели в результате дискриминирующих экспериментов осуществляется с помощью тех или иных критериев. Более распространены следующие три критерия. Один из них основан на мере, зависящей от разности между суммами квадратических отклонений; второй — на использовании модуля логарифма обобщенного отношения правдоподобия, вычисленного для двух конкурирующих гипотез; в третьем критерии используется статистическая информационная мера расхождения Кульбака.

Результаты постановки дискриминирующих экспериментов убедительно показали, что выбор моделей, основанный иа математическом планировании дискриминирующих экспериментов, более эффективен по сравнению с интуитивным выбором.

Как отмечают Я.Р. Магнус, П.К. Катышев и А.А. Пересецкий [181], математические модели полезны для более полного понимания сущности происходящих процессов, их анализа. Модель, построенная и верифицированная на основе (уже имеющихся) наблюдённых значений объясняющих переменных, может быть использована для прогноза значений зависимой переменной в будущем или для других наборов значений объясняющих переменных.

Использование математических моделей в последнее время находит всё более широкое применение в различных областях науки и техники. Определив систему, подлежащую анализу, и выбрав критерии, обычно разрабатывают математическую модель объекта, основанную на известных уравнениях Ньютона, Бернулли, Эйлера и характеризующую его поведение при определенных внешних воздействиях. Математическая модель позволяет при минимальных затратах времени и средств теоретически проверить по выбранному критерию проект с учетом любых его изменений без необходимости строить и испытывать физическую модель [148, с. 6].

Математическое моделирование позволяет посредством математических символов и зависимостей составить описание функционирования технического объекта в окружающей внешней среде, определить выходные параметры и характеристики, получить оценку показателей эффективности и качества, осуществить поиск оптимальной структуры и параметров объекта. Применение математического моделирования при проектировании в большинстве случаев позволяет отка-

заться от физического моделирования, значительно сократить объемы испытаний и доводочных работ, обеспечить создание технических объектов с высокими показателями эффективности и качества. Одним из основных компонентов системы проектирования в этом случае становится математическая модель.

Применение математического моделирования при проектировании в большинстве случаев позволяет отказаться от физического моделирования, значительно сократить объемы испытаний и доводочных работ, обеспечить создание технических объектов с высокими показателями эффективности и качества. Одним из основных компонентов системы проектирования в этом случае становится математическая модель [28, с. 8].

В кибернетическом словаре [208, с. 377] понятие математической модели следующее: это система математических соотношений, описывающая изучаемый объект, процесс или явление. Математическая модель — это совокупность математических объектов и отношений между ними, адекватно отображающая физические свойства создаваемого технического объекта. В качестве математических объектов выступают числа, переменные, множества, векторы, матрицы и т. п. Процесс формирования математической модели, использования ее для анализа и синтеза называется математическим моделированием. В конструкторской практике под математическим моделированием обычно понимается процесс построения математической модели, а проведение исследований на модели в процессе проектирования называют вычислительным экспериментом. Такое деление удобно для проектировщиков и функционально вполне обосновано, поэтому в дальнейшем будем придерживаться этой терминологии.

Как считает В. П. Тарасик [187, с. 22], обычно в уравнениях математической модели фигурируют не все фазовые переменные, а только часть из них, достаточная для однозначной идентификации состояния объекта. Такие фазовые переменные называют базисными координатами. Через базисные координаты могут быть вычислены значения и всех остальных фазовых переменных.

К математическим моделям предъявляются требования адекватности, экономичности, универсальности. Эти требования противоречивы, поэтому обычно для проектирования каждого объекта используют свою оригинальную модель. Модель считается адекватной, если отражает исследуемые свойства с приемлемой точностью. Точность оценивается степенью совпадения предсказанных в процессе вычислительного эксперимента на модели значений выходных параметров с истинными их значениями. Погрешность модели по всей совокупности m учитываемых выходных параметров оценивается одной из норм вектора $\vec{\varepsilon}_i = (\varepsilon, \varepsilon_j..., \varepsilon_m)$ [187]:

$$\varepsilon = ||\vec{\varepsilon}_m|| = \max |\varepsilon_j|, j \in [1{:}m], \tag{3.54}$$

или

$$\varepsilon = ||\vec{\varepsilon}_m|| = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \varepsilon_j^2}\,. \tag{3.55}$$

ε_j — относительная погрешность модели по j-му выходному параметру:

$$\varepsilon_j = (\overline{y}_j - y_j)/y_j,$$

$\overline{y}_j$ — значение j-го выходного параметра, полученное в результате вычислительного эксперимента на принятой для проектирования математической модели; y_j — значение того же параметра, полученное при испытаниях технического объекта в контролируемых тестовых условиях или в вычислительном эксперименте на более сложной математической модели, точность которой проверена и отвечает принятой норме.

Математическая модель вида (3.54) относится к аналитической. Она позволяет легко и просто решать задачи определения оптимальных параметров. Поэтому, если представляется возможность получения модели в таком виде, ее всегда целесообразно реализовать, даже если при этом придется выполнить ряд вспомогательных процедур. Такие модели обычно получают методом планирования эксперимента (вычислительного или физического).

Математические модели технических объектов, используемые при проектировании, предназначены для анализа процессов функционирования объектов и оценки их выходных параметров [187, с. 24]. Они должны отображать физические свойства объектов, существенные для решения конкретных задач проектирования. При этом математическая модель должна быть как можно проще, но в то же время обеспечивать адекватное описание анализируемого процесса.

Математические модели классифицируют по характеру математических понятий, применяемых для построения моделей (непрерывные, дискретные, стохастические и др.) [208, с. 377]. Важными характеристиками математической модели является степень её адекватности реальному процессу и её реализуемость на имеющихся технических средствах. Знание математической модели позволяет исследовать соответствующие процессы или явления, не прибегая к дорогостоящим натурным экспериментам, а заменяя их имитацией на ЭВМ.

Классификация математических моделей, используемых при проектировании технических систем, приведена на рис. 3.12 [187].

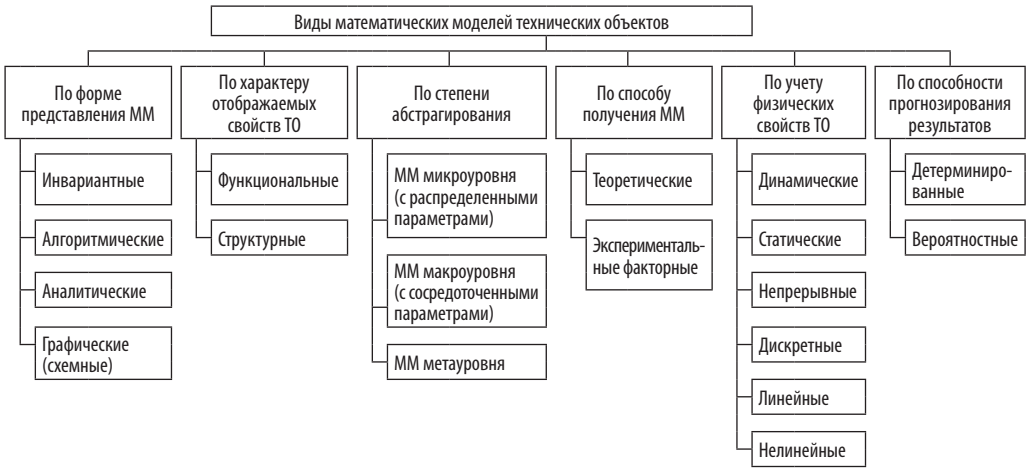


Рис. 3.12. Классификация математических моделей технических объектов (ТО) [187]

В зависимости от степени абстрагирования при описании физических свойств технической системы различают три основных иерархических уровня: верхний, или метауровень; средний, или макроуровень; нижний, или микроуровень [187].

Метауровень соответствует начальным стадиям проектирования, на которых осуществляется научно-технический поиск и прогнозирование, разработка концепции и технического решения, разработка технического предложения. Для построения математических моделей метауровня используют методы морфологического синтеза, теории графов, математической логики, теории автоматического управления, теории массового обслуживания, теории конечных автоматов.

На макроуровне объект проектирования рассматривают как динамическую систему с сосредоточенными параметрами. Математические модели макроуровня представляют собой системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Эти модели используют при определении параметров технического объекта и его функциональных элементов.

На микроуровне объект представляется как сплошная среда с распределенными параметрами. Для описания процессов функционирования таких объектов используют дифференциальные уравнения в частных производных. На микроуровне проектируют неделимые по функциональному признаку элементы технической системы, называемые базовыми элементами. Примерами таких элементов являются рамы, панели, корпусные детали, валы, диски фрикционных механизмов и др. Проектирование их основано на анализе сложнонапряженного состояния. При этом, естественно, базовый элемент рассматривается как система, состоящая из множества однотипных функциональных элементов одной и той же физической природы, взаимодействующих между собой и находящихся под воздействием внешней среды и других элементов технического объекта, также являющихся внешней средой по отношению к базовому элементу.

На всех рассмотренных иерархических уровнях используют следующие виды математических моделей: детерминированные и вероятностные, теоретические и экспериментальные факторные, линейные и нелинейные, динамические и статические, непрерывные и дискретные, функциональные и структурные.

По форме представления математических моделей различают инвариантную, алгоритмическую, аналитическую и графическую модели объекта проектирования.

В инвариантной форме математическая модель представляется системой уравнений (дифференциальных, алгебраических) вне связи с методом решения этих уравнений.

В алгоритмической форме соотношения модели связаны с выбранным численным методом решения и записаны в виде алгоритма — последовательности вычислений.

Аналитическая модель представляет собой явные зависимости искомых переменных от заданных величин (обычно зависимости выходных параметров объекта от внутренних и внешних параметров). Такие модели получают на основе физических законов либо в результате прямого интегрирования исходных диффе-

ренциальных уравнений, используя табличные интегралы. К ним относятся также регрессионные модели, получаемые на основе результатов эксперимента.

Графическая (схемная) модель представляется в виде графов, эквивалентных схем, динамических моделей, функциональных, кинематических и алгоритмических схем, диаграмм, циклограмм и т.п. Для использования графических моделей должно существовать правило однозначного соответствия условных изображений элементов графической и компонентов инвариантной математических моделей.

Среди алгоритмических моделей выделяют имитационные модели, предназначенные для имитации физических и информационных процессов, протекающих в объекте при функционировании его под воздействием различных факторов внешней среды.

Математические модели могут представлять собой функциональные зависимости между выходными, внутренними и внешними параметрами [187]:

$$\vec{Y} = \vec{F}(\vec{X}, \vec{Q}), \tag{3.56}$$

где $\vec{Y}$, $\vec{X}$, $\vec{Q}$ — векторы выходных, внутренних и внешних параметров соответственно: $\vec{Y} = (y_j), j = \overline{1,m}$; $\vec{X} = (x_i), i = \overline{1,n}$; $\vec{Q} = (q_k), j = \overline{1,l}$; *m, n, l* — число выходных, внутренних и внешних параметров соответственно; $\vec{F}(\bullet)$ — вектор-функция.

Деление математических моделей на функциональные и структурные определяется характером отображаемых свойств технического объекта.

Структурные модели отображают только структуру объектов и используются при решении задач структурного синтеза. Параметрами структурных моделей являются признаки функциональных или конструктивных элементов, из которых состоит технический объект и по которым один вариант структуры объекта отличается от другого.

Эти параметры называют морфологическими переменными. Структурные модели имеют форму таблиц, матриц и графов. Наиболее перспективно применение древовидных графов типа И-ИЛИ-дерева. Они позволяют аккумулировать накопленный опыт, используя описания всех существующих аналогов, известных из патентной литературы и гипотетических объектов. Такие модели наиболее широко используют на метауровне при выборе технического решения.

Функциональные модели описывают процессы функционирования технических объектов и имеют форму систем уравнений. Они учитывают структурные и функциональные свойства объекта и позволяют решать задачи как параметрического, так и структурного синтеза. Их широко используют на всех иерархических уровнях, стадиях и этапах, при функциональном, конструкторском и технологическом проектировании. На метауровне функциональные модели позволяют решать задачи прогнозирования, на макроуровне — выбора структуры и оптимизации внутренних параметров технического объекта, на микроуровне — оптимизации параметров базовых элементов и несущих конструкций.

По способам получения функциональные математические модели делятся на теоретические и экспериментальные [187].

Теоретические модели получают на основе описания физических процессов функционирования объекта, а экспериментальные — на основе изучения поведения объекта во внешней среде, рассматривая его как кибернетический «черный ящик». Эксперименты при этом могут быть физические (на техническом объекте или его физической модели) или вычислительные (на теоретической математической модели).

При построении теоретических моделей используют физический и формальный подходы.

Физический подход сводится к непосредственному применению физических законов для описания объектов, например, законов Ньютона, Гука, Кирхгофа, Фурье и др.

Формальный подход использует общие математические принципы и применяется при построении как теоретических, так и экспериментальных моделей.

Построение теоретических формальных моделей основано на вариационном принципе Гамильтона-Остроградского. Для динамических систем с сосредоточенными параметрами вариационный принцип приводит к уравнениям Лагранжа второго рода.

Экспериментальные модели — формальные. Они не учитывают всего комплекса физических свойств элементов исследуемой технической системы, а лишь устанавливают обнаруживаемую в процессе эксперимента связь между отдельными параметрами системы, которые удается варьировать и (или) осуществлять их измерение. Варьируемые параметры при этом называют факторами. Такие модели дают адекватное описание исследуемых процессов лишь в ограниченной области факторного пространства, в которой осуществлялось варьирование факторов в эксперименте. Поэтому экспериментальные математические модели носят частный характер, в то время как физические законы отражают общие закономерности явлений и процессов, протекающих как во всей технической системе, так и в каждом ее элементе в отдельности. Следовательно, экспериментальные факторные модели не могут быть приняты в качестве физических законов. Вместе с тем методы, применяемые для построения этих моделей (метод статистических испытаний, регрессионный анализ, корреляционный анализ, планирование эксперимента и др.), широко используются при проверке научных гипотез.

Функциональные математические модели могут быть линейные и нелинейные.

Линейные модели содержат только линейные функции фазовых переменных и их производных. Характеристики многих элементов реальных технических объектов нелинейные. Математические модели таких объектов включают нелинейные функции фазовых переменных и (или) их производных и относятся к нелинейным.

С целью упрощения задач проектирования на высших иерархических уровнях используют простые линейные модели. Если описание технического объекта представлено системой линейных обыкновенных дифференциальных уравнений, то, применяя преобразование Лапласа, ее можно привести к системе алгебраических уравнений с комплексными переменными, решение которой значительно

проще, чем исходной системы дифференциальных уравнений. Такой подход используется для построения математических моделей на метауровне. В моделях макроуровня следует учитывать нелинейные свойства технического объекта.

Если при моделировании учитываются инерционные свойства технического объекта и (или) изменение во времени параметров объекта или внешней среды, то модель называют динамической. В противном случае модель статическая. Выбор динамической или статической модели определяется режимом работы технического объекта, положенным в основу проводимой процедуры анализа в маршруте проектирования. Большинство задач функционального проектирования требует использования динамических моделей. При конструкторском проектировании часто применяют статические модели, а динамические эффекты процесса функционирования объекта учитывают при формировании нагрузочных характеристик посредством коэффициентов динамичности, определяемых в процессе функционального проектирования.

Это понятие модели встречается у отдельных авторов, а также продолжающейся дифференциации на различные математические дисциплины — во многих работах по проблемам оснований математики и математической логики [342].

Поскольку исследование оснований математики имеет для математики в целом большое значение, то уже поэтому это понятие модели играет фундаментальную роль. Во всяком случае, в работах прикладного характера часто можно встретить другие формулировки, по которым сразу не видно, что они могут быть сведены к этому определению. Так, например, М. Пешель понимает под моделями «квантифицированное изображение нашего знания о явлениях объективной реальности» [376]. Их существенную познавательную функцию он усматривает в том, что модель замещает реальный объект и делает возможным, таким образом, экспериментальное исследование его закономерностей.

Тезис Г. Ассера, что понятию модели в исследованиях оснований математики подчиняется понятие модели естественных наук, с философской теоретико-познавателыюй точки зрения нельзя принять, не подвергнув тщательной проверке, тем более что при этом указывается на «опосредующую роль языка», также важную в теоретико-познавательном отношении. В работе Г. Ассер [368] на этом вопросе подробно не останавливается. С другой стороны, там, где он излагает, как с точки зрения исследования оснований математики следует рассматривать общую научно-теоретическую проблему моделирования, он высказывает мнение, фактически совпадающее с мнением Пешеля, если не обращать внимания на оговорки последнего насчет квантифицированного изображения: «Сущность так называемой математизации следует, но нашему мнению, усматривать в том, что некоторые существенные черты объективной реальности более или менее точно описываются с помощью математических моделей и на основе изучения этих математических моделей делаются выводы о структуре этой реальности» [376].

Известно, что математизация является важным аспектом развития науки в настоящее время [376, с. 14]. Однако теория приносит пользу не только тогда, когда она математизирована. Й. Аут исследует роль теории при решении техни-

ческих проблем и выделяет математизацию как весьма важную сторону физико-теоретического проникновения в существо проблемы. Она может иметь практическое значение, как это показано им на примере проекта электронной схемы, где определение геометрических размеров простого колебательного контура есть не что иное, как элементарное применение электродинамики Максвелла. Й. Аут разделяет взгляд Р. Ромпе, «что математическое описание дает всегда практические результаты там, где основные уравнения физики и элементарные постоянные в сущности являются достаточными для описания, а не там, где постоянные стоят на первом месте» [369, с. 30]. Он обосновывает эту точку зрения тем, что теория играет определенную роль тогда, когда «не удается заранее рассчитать с помощью более или менее сложных математических методов и более или менее дорогостоящих электронно-вычислительных машин свойства и характеристики поведения объекта с необходимой степенью точности. Последнее в большинстве случаев оказывается недостижимым.

Отношение «эксперимент – модель – теория» характеризует основную и элементарную структуру процесса научного познания [359, с. 162]. Эта структура видоизменяется в отраслевых научных дисциплинах в соответствии с объективными особенностями областей знания и общественно-обусловленными направлениями исследований. Существуют лабораторные эксперименты, эксперименты непосредственно в природе, эксперименты на моделях, мысленные эксперименты.

Существуют естественные и искусственные материальные модели, изобразительные и прочие идеальные модели. Существует множество теорий, отличающихся между собой по форме и по содержанию, сформулированных на логико-математическом или на обиходном языке. И, как отмечает П. Франц [359, с. 163], взаимоотношения «эксперимент – модель», «эксперимент – теория», «модель – теория» и «эксперимент – модель – теория» в совокупности имеют в каждом случае особый характер.

Сравним теперь такое понимание математических моделей с образованием моделей в частных науках [342, с. 186]. При этом в качестве примера выберем способ рассмотрения, который, по общему признанию, близок математическому мышлению, соответствуя в то же время совершенно однозначно частнонаучным целям. В связи с психологическим исследованием процессов решения проблем Ф. Кликс приходит к формулировке: «В качестве специального метода, основывающегося на фундаментальном принципе образования по аналогии, называлась эвристическая техника образования моделей. Суть его состоит в проецировании только частично, а подчас только в малой степени известной структуры данной проблемы на проблемное пространство с известной основной структурой, в поиске решения с помощью заданных параметров проблемы и в обратном переносе решения на проблему оригинала. Если в результате произведенных в модели преобразований будет найдено искомое решение проблемы оригинала, то тогда считается, что эвристическая стратегия образования модели способствовала получению решения или облегчила его поиск» [342]. Понятие модели, лежащее в основе этого представления об образовании модели, с полной очевидностью встречается

уже у Г. Клауса: «Под моделью понимают отражение фактов, вещей и отношений определенного раздела науки на более простых, более обозримых материальных структурах этого раздела или других разделов. Следовательно, в случае модели речь идет о предмете исследования, аналогичной предмету исследования в определенных существенных структурах и отношениях системы, использование которой при исследовании определенных предметных областей основывается на научном обосновании заключений по аналогии» [359].

Из подобного рассмотрения существа дела со всей очевидностью вытекает, что понятие математической модели в только что указанном смысле математического описания нематематического объекта (в виде объективно реальных структур и процессов, исследуемых какой-либо частнонаучной дисциплиной) не обязательно совпадает с понятием математической модели в ранее упомянутом (Г. Ассер) смысле [342, с. 187], в соответствии с которым подобная модель представляла бы собой интерпретацию содержащихся в элементарных выражениях определенного множества высказываний символов свойств или отношений. Это разделение двух различных понятий модели, конечно, тесно связано с их сопоставлением, предпринятым в свое время К. Шрётером [379]. Такое совпадение возможно только тогда, когда интерпретация в смысле первоначально упомянутого понятия модели сводится к соотнесенности с нематематическими данными другого объекта. Но как раз для этой цели это математически-логическое понятие модели (например, в исследованиях оснований математики) в общем не используется. Подпадающее под него или совпадающее с ним понятие модели аксиоматической системы применялось обычно для постановки виутриматематических проблем и показало при этом свою плодотворность.

Подводя итоги сказанному, следует отметить, что, как считает Х. Либшер [342, с. 190-191], нет никаких оснований сводить используемые сегодня в многообразных формах в различных отраслях современной науки понятия модели к какому-то одному, и в особенности к понятию модели математической логики. Это с очевидностью вытекает уже из того, что в общей проблематике моделей речь идет не о математических, а о философских — теоретико-познавательных вопросах, которые должны решаться философскими средствами. Подобная претензия философии могла бы показаться чрезмерной, если бы она не учитывала результатов частных наук. В то же время выяснилось, что философский анализ частнонаучных понятий не может ограничиваться только анализом понятий, а предполагает исследование понятий в той связи, в которой они образуются, используются и изменяются. Такое понимание включает в себя отграничение от всяких исключительно семантических исследований, как это характерно для определенных разновидностей позитивизма.

Модели представляют собой специфические средства познания, которые призваны служить теоретическому и практическому овладению объектом. Поэтому необходимо искать оптимальные модели, соответствующие этим целям. Как считает Г. Гёрц [21, с. 14], слишком далеко идущие упрощения могут помешать овладению объектом, а отказ от упрощений — затруднить познание. Последнее

означало бы требование описания объектов и процессов во всех их аспектах, что невозможно ввиду неисчерпаемости связей. Научно оправданная редукция является поэтому важной составной частью практического и теоретического анализа.

Модели могут формулироваться гипотетически. При исследовании и применении моделей должна быть учтена роль объективно-реальных аналогий (включая гомологии) [359, с. 129]. Модели, как и научные гипотезы, как считали Маркс К., Энгельс Ф. [359], мы можем рассматривать как форму развития науки. С подобной точкой зрения совпадает мнение некоторых физиков, согласно которому еще не окончательно разработанные теории можно рассматривать в качестве моделей будущих совершенных теорий. Здесь различие между моделью и теорией усматривается прежде всего в их функции в процессе познания.

Н. Хагер предлагает дать следующее рабочее определение мысленным и материальным моделям [359]: моделью является мысленно представленная или материально реализованная система, которая адекватно отражает объект исследования или аналогично воспроизводит специфические свойства и соотношения. Она должна быть в состоянии представить объект так, чтобы облегчить его изучение, обеспечить получение об этом объекте новых знаний, составление прогнозов, лучшее управление определенными явлениями или оптимизацию определенных объектов или процессов. Все это должно способствовать лучшему овладению или использованию самого объекта или процесса или моделированию определенных свойств объекта (процесса).

Под теорией следует понимать объединение существенных взаимосвязей и законов в единую систему с соответствующими условиями существования [342]. При определенных условиях теория может осуществлять функцию модели (например, в математике при интерпретации одной теории при помощи другой).

Хотя метод моделирования наилучшим образом зарекомендовал себя в разных областях науки и техники и широко применяется и настоящее время, сегодня еще нет единого понимания содержания понятия модели [342, с. 183]. Как считает Х. Либшер, при этом отчетливо проявляются две основные тенденции. Одна из них состоит в том, что математическое понятие модели, определенное тем или иным образом (для различных областей самой математики речь не обязательно должна идти об одном и том же понятии), представляет собой общую основу для любого вида моделирования. Другая же тенденция склонна видеть в математическом понятии модели (или математических понятиях модели) один из видов моделей среди многих других. Эти тенденции нельзя резко противопоставлять друг другу. Прежде всего, в отдельных конкретных формулировках они проявляются различным образом, включая в себя как попытки строгого построения всевозможных методик моделей, так и непреодолимый разрыв между в корне различными понятиями модели. Между этими двумя крайними точками зрения существует множество промежуточных, как, например, такая, которая рассматривает математическое понятие модели как бы в более узком значении, применяемом только в рамках самой математики (поэтому его иногда называют внутриматематическим понятием модели), и математическое понятие модели в широком смысле, которое в то же время мог-

ло бы служить основой всех понятий модели. Подобная точка зрения в принципе высказывается, например, в словаре по кибернетике: «В настоящее время не представляется... ни возможным, ни целесообразным выдвинуть универсальное понятие модели, которое включало бы в себя все специальные понятия модели. Так, например, в математической логике и в исследовании оснований математики под понятием «модель» понимают особенное в отношении к общему, от которого образована модель: модель аксиоматической системы является конкретной интерпретацией этой системы. Поскольку понятие модели используется в других науках, то это отношение выглядит как раз наоборот: модель здесь является общим по отношению к особенному, от которого образована модель. Модель может служить в качестве таковой для различных состояний, процессов и т. д.» [342].

З. Пауль задаётся вопросом: носят ли математически сформулированные высказывания характер модели [351]. Он сравнивает предложенные им пять фаз математического моделирования с процессом открытия и анализа объективных законов, их представлениями в форме математически формулируемых высказываний о законах и прежде всего с прогностической функцией (функцией предсказания) такого рода высказываний, то обнаружится следующее:

1. Первые три фазы моделирования соответствуют, как правило, реальному конкретно-историческому процессу открытия и анализа объективных законов и их описания в форме математически сформулированных высказываний.

2. Четвертая и пятая фазы моделирования реализуются математически сформулированными высказываниями о законах прежде всего тогда, когда речь идет о «выведении путем абстрагирования из известных высказываний относительно закона и условий его действия других высказываний о до сих пор неизвестном» [330]. По мнению Д. Шульце, высказывания, полученные на основании прогностических выводов, можно под углом временного аспекта разделить на три класса:

а) класс независимых от времени прогностических высказываний об объектах, состояниях и ситуациях прошлого, настоящего и будущего, которые, в принципе, в данный момент могут быть практически проверены относительно их истинности;

б) класс высказываний относительно прошлых ситуаций и состояний объекта (так называемых ретродукций), выступающих прежде всего при исторических исследованиях, которые уже не могут быть непосредственно практически проверены, поскольку данные ситуации больше не существуют;

в) класс высказываний о будущем, относящихся к несуществующим, но реально возможным в будущем ситуациям и тенденциям, которые, однако, не могут быть в настоящее время проверены на практике, так как мысленно предугаданная ситуация или состояние объекта пока не существуют.

Эвристическая роль математики по сравнению с другими науками наиболее ярко проявляется, по мнению Г. И. Рузавина, при использовании метода математической гипотезы [357, с. 204]. Этот метод в самом общем виде можно охарактеризовать как способ обнаружения математической зависимости явлений в процессе выведения следствий из условных (предполагаемых) уравнений и их экспериментальной проверки.

Как отмечает З. Пауль, в процессе математического моделирования более или менее отчетливо различаются следующие основные фазы [351, с. 199]:

а) установление существенных и несущественных элементов, свойств и отношений моделируемого оригинала;

б) мысленное изолирование (выделение) существенных элементов, свойств и прежде всего существенных отношений этого оригинала и его представление в системе абстракций (абстрактный образ $АА_1$ моделируемого оригинала);

в) математическое отображение $АА_1$ (построение абстрактного образа $АА_2$);

г) формальное выведение заключения из $АА_2$ с помощью математических или (и) формально-логических методов — заключений, которые не могут быть непосредственно выведены из $АА_2$;

д) интерпретация и оценка заключений, вытекающих из формальных выводов.

Таким образом, математические модели, с одной стороны, воплощают уже полученные знания и, с другой стороны, служат для получения новых знаний. Термин «новые знания» следует понимать здесь в смысле получения новых знаний относительно моделируемых внематематических явлений, а не в смысле получения новых знаний внутриматематической природы.

Лучшее понимание многих вопросов теории познания, как считает Н. Хагер [359, с. 131], достигается путем выявления этапов формирования моделей. При этом выдвигаемые общие представления проверяются и уточняются на историческом материале. Стадии формирования моделей можно, по-видимому, определить также с других точек зрения, например, путем соотнесения с уровнями познания закона, достигнутого в модели или с помощью модели.

Изложенная здесь концепция моделирования [359], помимо всего прочего, имеет целью включение моделей в процесс создания теорий, поскольку идеальные модели могут быть предварительной ступенью в построении теории или моделью интерпретации теории. Вычлененные этапы формирования моделей облегчают раскрытие взаимосвязи процессов создания модели и создания теории, указывая в то же время на практическое использование выводов, полученных путем моделирования. При этом модели и научные гипотезы, которые в процессе создания модели могут играть важную роль, подразделяются следующим образом.

Гипотезы отличаются от идеальных моделей, являющихся идеализированными объектами теории, и могут быть представлены как предварительная ступень или модель интерпретации теории, прежде всего благодаря своей функции в процессе познания в качестве научно обоснованного предположения о до сих пор неизвестных или недоступных явлениях [359]. Гипотезы могут рассматриваться как предварительные ступени формирующихся моделей и в подобном качестве связаны с моделями. Отдельные научные гипотезы могут быть также сформулированы в виде моделей, которые являются предварительным этапом формирования теории или моделью ее интерпретации. В этом случае модели можно рассматривать в качестве формы проявления физических гипотез для определенного ограниченного этапа в процессе создания теорий. Если же эта гипотеза подтверждена, то модель больше не носит гипотетического характера, но остается тем не

менее идеализированным объектом теории. Таким образом, не утверждается, что модель и гипотеза равноценны.

Как отмечает З. Пауль [351, с. 203], мы можем отметить, что математически сформулированные законы — по крайней мере как правило — имеют характер модели. Они отражают не только уже известные, эмпирически полученные и выраженные в форме таблиц значений зависимости между определенными индивидуальными значениями величин, входящих в соответствующий объективный контекст закона, но одновременно — например, через обобщение таблиц значений, через отражение с помощью функции связей между величинами — они гипотетически вырабатывают в результате научных экстраполяции и интерполяций новые, в объективной реальности еще не обнаруженные связи между определенными индивидуальными значениями соответствующих величин [375].

3.5. Математическая модель динамики ГС МПС и МПС с ГС

С точки зрения механики МПС представляет собой систему, которая объединяет два разнородных объекта: привязной объект, который может рассматриваться как абсолютно твердое тело, и ГС — систему с распределенными параметрами. Динамика первого объекта математически может быть описана системой обычных дифференциальных уравнений, динамика второго — системой уравнений в частных производных [159]. При этом математическая модель включает: математическую модель ГС; математические модели тел, которые соединяются из ГС на ее концах; уравнения, которые описывают динамику тел как предельные условия для ГС.

Математическое представление динамической модели в общем случае может быть выражено системой дифференциальных уравнений, а статической — системой алгебраических уравнений. Динамическая модель может также представлять собой интегральные уравнения, передаточные функции, а в аналитической форме — явные зависимости фазовых координат или выходных параметров технического объекта от времени.

Воздействия внешней среды на технический объект носят случайный характер и описываются случайными функциями. При проектировании также учитывается случайный разброс параметров элементов объекта, обусловленный технологическим процессом изготовления. Все процессы, происходящие в объекте, также случайны и могут быть оценены вероятностными и статистическими характеристиками: вероятностью выполнения тех или иных требований, корреляционной функцией, спектральной плотностью, математическим ожиданием, дисперсией и др. Анализ функционирования объекта в этом случае требует построения вероятностной математической модели. Однако такая модель довольно сложна и ее использование при проектировании требует больших затрат машинного времени. Поэтому ее применяют чаще на заключительном этапе проектирования [187].

Большинство проектных процедур выполняются на детерминированных моделях. Детерминированная математическая модель характеризуется взаимно однозначным соответствием между внешним воздействием на динамическую систему и её реакцией на это воздействие. В вычислительном эксперименте при проектировании обычно задают некоторые стандартные типовые воздействия на объект: ступенчатые, импульсные, гармонические, кусочно-линейные, экспоненциальные и др. Их называют тестовыми воздействиями.

Аналитические методы сейчас нельзя считать достаточно алгоритмичными [416, 417]. Наиболее перспективным при этом считается применение численных методов. ГС, находящаяся в воде и являющаяся пространственным криволинейным объектом, до приложения нагрузки сохраняет свою форму до тех пор, пока на него не начнут воздействовать какие-либо силы. При функционировании МПС примером таких воздействий могут служить усилия на ГС судов-буксировщиков, течений, ПА, аварийные режимы работы. При этом следует учитывать не только технические условия, но и механические нагрузки на ГС, которые возникают из-за влияния ветра, волнения моря, морских течений и маневров плавсредств.

Составление модели — это один из центральных этапов исследования, на котором разрабатывается аналог реального объекта или процесса путем создания мысленного образа (мысленные модели), описания и отображения на картах, схемах, чертежах (знаковые модели), учета наиболее существенных факторов и взаимосвязей между ними математическими зависимостями (математические модели), а также с помощью электронно-вычислительной техники (машинные модели) или специальной игры (игровые модели) [281, с. 23].

Разработке модели любого вида предшествует, как правило, глубокий теоретический анализ исследуемой системы (процесса, явления), выявление их внутренней структуры, взаимосвязей и взаимозависимостей между составляющими элементами, а также взаимодействия с внешней средой. Модель становится важнейшим инструментом дальнейшего исследования процесса и получения сравнительной оценки намеченных альтернативных вариантов решения задачи.

На первом этапе математического моделирования, как считает В. С. Ястребов, разрабатываются математические модели объектов управления, окружающей подводный комплекс внешней среды, составляются моделирующие программы для вычислительной системы, на которой решено проводить моделирование, и исследуются на этих моделях различные алгоритмы работы исполнительного контура управления подводного комплекса [160, с. 309]. Существенной особенностью математического моделирования является возможность работы в произвольном масштабе времени. По мнению экспертов фирмы «Рэндкорпорейшен», задача программирования поведения робота является наиболее сложной задачей в истории развития программирования.

Из общей цели исследования можно выделить основную часть, посвящённую исследованию динамики ГС в условиях, характерных для МПС, с помощью математического моделирования. Конечной целью исследования является совершенствование проектирования ГС МПС, основывающееся на совершенствовании су-

ществующих методов проектирования ГС МПС путём разработки компьютерной программы моделирования динамики гибких связей с учётом их эксплуатационных характеристик, и позволяющее более правильно и рационально проектировать новые ГС для МПС с необходимыми свойствами и параметрами, а также разработка рекомендаций по прогнозированию возможных эксплуатационных нагрузок для проектирования таких устройств.

Несмотря на функциональное и конструктивное разнообразие современных МПС и ППС, их создатели сталкиваются с рядом сходных проблем и нуждаются в разработке общих подходов к их разрешению [409]. В частности, к таким проблемам относятся проблемы гидродинамики. При создании движущихся под водой привязных систем и аппаратов изучение вопросов их динамики, силового воздействия среды и судна-носителя, вопросы управления и стабильности движения являются первостепенными и во многом определяют возможность нормального функционирования аппаратуры, установленной на них. При этом наиболее существенной особенностью динамики привязных подводных систем, усложняющей ее по сравнению с известной теорией движения в жидкости и газе автономных твердых тел (самолетов, подводных и надводных судов и т.п.), является необходимость учета влияния гибкой связи как системы с распределенными параметрами, также взаимодействующей с потоком жидкости.

Приближенные математические модели технических объектов на микроуровне получают на основе методов сеток. В зависимости от способов осуществления дискретизации и алгебраизации краевых задач различают два метода сеток; метод конечных разностей (МКР) [187] и метод конечных элементов (МКЭ). Для осуществления вычислительного эксперимента на ЭВМ, как правило, необходимо разработать алгоритм реализации математической модели.

Важное значение при математическом моделировании приобретает системный подход. Как отмечал Б. Кривинский [281], системный подход можно охарактеризовать как общую стратегию использования научной методологии для решения сложных и взаимосвязанных проблем, рассматриваемых как единое целое. Методологическая специфика такого подхода заключается в том, что она ориентирует исследование на раскрытие целостности объекта и выявление его структуры, внутренних и внешних связей и сведение их в единую теоретическую картину. При этом системный подход неразрывно связан с фундаментальными идеями материалистической диалектики о всеобщей связи и взаимообусловленности явлений в природе и обществе и является инструментом практического использования их при решении конкретных научных, технических, социально-экономических и военных проблем.

Центральным, ключевым понятием, на котором базируется системный подход, является понятие системы. Практически любой объект можно рассматривать как систему. Этим в значительной степени объясняется все более широкое проникновение системных представлений в самые различные области научной и практической деятельности.

В самом общем виде любая система представляет собой совокупность взаимосвязанных элементов, образующих определенную целостность, единство. Та-

ким образом, с одной стороны, система — нечто единое, целое, с другой — она имеет сложную внутреннюю структуру, состоит из взаимосвязанных элементов, находящихся между собой в определенных отношениях и взаимозависимостях. Именно это обстоятельство вызывает необходимость системного подхода к исследованию сложных проблем, требует как рассмотрения их в целом, так и тщательного анализа всей внутренней структуры, раскрытия свойств и взаимосвязей составных элементов, связей с внешней средой и взаимодействующими системами. Однако следует учитывать, что общие свойства системы не являются простой суммой свойств составляющих ее элементов, а определяются совместным их функционированием в условиях реальной окружающей среды.

Существуют различные классификации систем по их физической природе, характеру функционирования, масштабам и степени сложности. В военной области особое значение имеют сложные динамические системы, которые состоят из ряда подсистем, меняют свое состояние во времени и функционируют, как правило, в условиях противодействия внешней среды (противника) и неопределенности (неполной информации об обстановке). К ним, например, относятся такие сложные объекты и процессы, как корабль, соединение, флот в целом; различные системы вооружения, освещения обстановки, управления и связи; система вооруженной борьбы на море в целом и отдельные формы боевых действий (операция, бой, удар и др.); системы оперативной, боевой и других видов подготовки; организационная структура штаба, соединения, части; процесс подготовки и принятия решения на бой или операцию и т. п. [281, с. 22].

Создание, анализ и совершенствование динамических систем, безусловно, требуют применения системного подхода, который уже подтвердил свою эффективность при решении ряда крупных технических и военных проблем [281, с. 22]. В современных условиях он не менее важен и при решении многочисленных сложных задач в области оперативного искусства и тактики, управления силами, планированияи организации боевых действий, учебного процесса, совершенствования организационной структуры и боевой готовности войск.

Разработка непосредственной методологии применения системного подхода к решению различных теоретических и практических проблем является предметом таких новых научных направлений, как теория больших систем, изучающая методы их синтеза, и анализ систем, применяемый для перспективного планирования при создании сложных систем и проведении крупных мероприятий в условиях неопределенности. В общем случае они включают следующие основные этапы исследовательской работы: постановку задачи; выбор критериев эффективности решения задачи; оценку факторов, влияющих на выполнение задачи, и ресурсов, выделенных или требуемых для ее решения; выбор альтернативных путей решения задачи; составление модели исследуемого объекта (процесса); моделирование и выполнение необходимых расчетов для сравнительной оценки намечаемых альтернативных путей; сравнение альтернатив и принятие решения.

С позиций системного подхода важно правильно уяснить не только суть непосредственно решаемой проблемы или задачи, но и ее место в рамках более

крупной проблемы (задачи), частью которой она является, а также взаимосвязь со смежными и низшего уровня задачами. Каждая сложная задача должна быть расчленена на ряд частных, взаимосвязанным решением которых достигается общая цель исследуемого процесса, планируемой работы или операции. Ее постановка — наиболее важный и ответственный этап анализа, от которого, по существу, зависят весь ход и результаты последующих исследований. Поэтому она должна основываться не на интуиции, а на глубоком и всестороннем анализе существа исследуемой проблемы.

Существует определенная последовательность математического моделирования объектов различной природы, которая обычно состоит из следующих этапов [179, с. 6–7]:

1. Выполняют анализ предметной области исследования, определяют основные закономерности и связи между элементами системы. Формулируют основные гипотезы и предположения, упрощающие исследуемый объект. Определяют основные параметры и переменные, которые характеризуют процессы в изучаемых объектах. В конце этапа формулируется задача исследования.

2. Создание математической модели объекта. Математическая модель — совокупность уравнений и неравенств, которые определяют связь между параметрами и переменными задачи.

3. Создание нового или выбор существующего метода решения системы уравнений и неравенств, составляющих математическую модель.

4. Тестирование метода решения и математической модели. Обычно выполняют на основе сравнения результатов математического моделирования с решением известных задач или экспериментальными данными. Если решения совпадают, то математическая модель и метод решения считают созданными и рекомендуют использовать их для моделирования изучаемых объектов. Иначе возвращаются к первому этапу, совершенствуют постановку задачи и повторяют все этапы до тестирования.

5. Выполнение расчетов, анализ полученных результатов, формирование выводов и рекомендаций.

Как отмечает В. П. Тарасик [187, с. 50], проектирование технических объектов на микроуровне осуществляют на основе приближенных математических моделей, получаемых путем аппроксимации исходных моделей, при этом точные решения дифференциальных краевых задач удается получить лишь для немногих частных случаев. Так же поступают и при решении большинства исследовательских задач. Аппроксимация осуществляется посредством дискретизации и алгебраизации дифференциальной краевой задачи.

Постановка задачи включает формулировку существа проблемы, определение целей и границ исследования, а также общую характеристику условий ее решения. Выбор критериев эффективности, т. е. количественных мер, используемых для сравнения эффективности вариантов достижения цели, тесно связан с определением цели исследуемой проблемы. Неточное определение цели обычно влечет за собой неправильный выбор критериев, что в свою очередь может привести

к неверной оценке сравниваемых вариантов действий и выбору далеко не лучшего способа решения задачи [281].

На первых этапах исследования, когда еще не известно, какое влияние оказывает на результаты каждая из переменных величин, следует составить по возможности полный их перечень. Затем на основе анализа чувствительности результатов решения задачи к различным факторам отбирают наиболее существенные из них, а второстепенные, влияние которых на ход исследуемого процесса окажется незначительным, могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения.

Оценка ресурсов, выделенных или необходимых для решения задачи, является одним из важных этапов системного анализа. При проведении экономических исследований, связанных с созданием новых систем вооружения и техники, ресурсы, как правило, оцениваются в стоимостном выражении. При решении оперативно-тактических задач они оцениваются как выделенный или потребный наряд сил и средств для достижения поставленной цели.

Подход к оценке расходуемых ресурсов при решении различных по своей физической сути задач имеет много общего. Во всех случаях целесообразно отбирать такие варианты, выполнение которых обеспечивается наличными материальными ресурсами или же с учетом реально имеющихся резервов. Остальные варианты могут представлять теоретический интерес. Их исследование позволяет выявлять перспективные пути решения рассматриваемой проблемы.

Чаще всего ГС моделируют абсолютно гибкой нитью. В механике под нитью понимается материальная система одного измерения, которая под действием приложенных сил может принять форму любой геометрической линии [62, с. 7]. Современная теория гибкой нити представляет широко разветвленную дисциплину, охватывающую самые различные аспекты этой науки [62, с. 5] и рассматривается как раздел теоретической механики, в котором содержатся вопросы теории абсолютно гибкой нити, которые наиболее близки к инженерным задачам. Особое внимание обращено на выбор рациональной формы дифференциальных уравнений равновесия или движения нити, определение граничных условий, сравнение и оценку различных методов.

В гл. 5 [62] рассматривается модель нити как частный случай стержня (нагружение нерастяжимой нити собственным весом и давлением, интегрирование уравнений краевой задачи для нити с использованием алгоритма пристрелки, плоская и пространственная задачи для нити под действием веса и сосредоточенных сил).

В [172] рассмотрены гибкие стержни и нити (общие сведения), основное уравнение прогиба нити, приведен расчёт гибких нитей без учёта упругости нити и собственного веса, расчёт гибких нитей с учётом собственного веса, расчёт нитей с учётом упругости материала нити и температурных деформаций.

В [85] рассмотрены модели гибких нитей в обобщённых потенциальных полях, асимптотический метод исследования пространственных конфигураций гибких нитей в потоках, нелинейная модель динамики нитей в потоках, дискретная модель нити.

В [356] изложен метод эквивалентной нагрузки, предназначенный для решения задач статики гибкой непологой нити под произвольной нагрузкой. Метод заключается в замене нагрузки общего вида, действующей на нить, нормальной к ней нагрузкой. Как считают авторы, такой приём позволяет упростить процедуру нахождения равновесной формы нити как при аналитическом, так и при численном исследовании.

В [347, с. 29] из всего разнообразия режимов движения и способов связи движущихся тел с помощью нити рассмотрена задача о буксировании тяжёлого тела. Авторами отмечается также, что математическая модель нити описывается сложной системой интегро-дифференциальных уравнений с частными производными. При этом ставилась задача получения математической модели нити как объекта регулирования. Предложенный способ позволяет приближённо определить любую передаточную функцию гибкой нерастяжимой нити при пространственном обтекании потоком с требуемой для практики точностью.

В [333] рассмотрено движение системы, состоящей из двух тел, соединённых гибкой нитью в стационарном потоке жидкости, когда в зависимости от глубины скорость потока изменяется по величине и направлению.

В [334] рассмотрены результаты экспериментальных исследований условий, соответствующих обтеканию нити поперечным потоком с переменной скоростью. Авторами отмечается, что при переменной скорости обтекания элементов нити локальная частота возмущений переменна по длине и совпадает с единой для всех элементов нити частотой её колебаний не более, чем в двух точках (при знакопеременной эпюре скорости потока) [335, с. 105], отсутствуют надёжные и достаточно полные данные о величинах поперечных возмущающих сил (зависимость их от скорости обтекания, частоты и амплитуды колебаний). Полученные в эксперименте данные позволяют по заданным параметрам потока и нити прогнозировать частоты её колебаний.

В [335] рассмотрена задача определения конфигурации натяжения нити. Гибкая нить заменена рядом жёстких элементов, соединённых шарнирами, позволяющими всей системе деформироваться (без трения) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, и рассмотрено равновесие одного элемента в стационарном потоке. Задача решена на ЭЦВМ: на печать выдаются координаты узловых точек (шарниров), дающие представление о форме нити в пространстве, и компоненты натяжения (или полное натяжение) в этих точках.

При разработке систем автоматического управления движущимися телами, связанными гибкой нитью, большая трудность заключается в получении математической модели нити как объекта регулирования. Это обусловлено тем, что математическая модель нити описывается сложной системой интегро-дифференциальных уравнений с частными производными, и важно получить не просто решение уравнений движения нити, а представить его в виде, удобном для анализа и синтеза системы автоматического управления [347]. В большинстве случаев бывает достаточно ограничиться рассмотрением малых колебаний нити, и тогда для описания ее движения целесообразно воспользоваться аппаратом передаточных функций.

В данной работе рассмотрена задача о буксировании тяжелого тела из всего многообразия режимов движения и способов связи движущихся тел с помощью нити и предлагается приближенный способ определения передаточной функции гибкой нерастяжимой нити при пространственном обтекании потоком без ограничений на величину стрелки ее провисания.

В [358] рассмотрена плоская задача о нерастяжимой нити, закреплённой в двух точках, находящихся на разных уровнях, с целью определения очертания оси нити и закона распределения натяжения нити, удовлетворяющие поставленным в задаче условиям.

Колебания устойчивости гибких нитей в потоках рассматривались в теоретических и экспериментальных работах [325, 332, 362], монографиях [61, 85].

В [170] рассмотрены основы механики нити.

В [322] рассмотрены особенности резонансных режимов поперечных и продольных по отношению к скорости потока колебаний нити (нелинейная модель динамики нити в потоке), дан численный анализ резонансных амплитуд и частот.

В [345] рассмотрен подход упрощения уравнений нелинейных колебаний растяжимой нити с телом в потоке при условии сохранения достаточно высокой точности решения, так как использование полной системы уравнений требует больших затрат машинного времени и практически не позволяет использовать аппроксимации нити набором более четырёх упругих и жёстких элементов. Проведенные расчёты показали, что использование аппроксимации приводит к уточнению решений задачи в окрестности главного резонанса. Резонансные кривые приобретают вид, типичный для систем с жёсткой характеристикой нелинейной восстанавливающей силы.

В [346] рассмотрены нелинейные параметрические колебания нити в соосном потоке без использования гипотезы Кирхгофа. Уравнения колебаний нити получены в виде уравнений Лагранжа II рода. Расчёты показали, что взаимодействие параметрических и вынужденных колебаний приводит к увеличению амплитуд поперечных колебаний нитей в соосном потоке, возбуждаемых заданными периодическими смещениями коренного конца.

В настоящее время уже опубликовано много работ, в которых теория гибкой нити излагается с различных точек зрения, различной полнотой и строгостью. Некоторые из них представляют монографии, посвященные узкой проблеме, часть работ охватывает очень широкий круг вопросов, главным образом, теоретического характера. Д. Р. Меркин отмечал, что в [62, с. 6] содержится свыше 200 различных библиографических ссылок и в той или иной форме дано изложение истории развития механики гибкой нити. В настоящее время таких источников, наверное, уже свыше нескольких тысяч.

Механика канатных систем подводных объектов исследовалась многократно применительно к различным схемам, условиям эксплуатации и в различной постановке [8, 11, 14, 16, 39, 86, 116, 144, 145, 172, 346].

В [176] рассмотрено равновесие троса при движении в воде (гидродинамические силы, действующие на элементарный отрезок троса, обтекаемый потоком

жидкости; пространственная задача о равновесии тяжёлого троса при движении в воде; задача о равновесии невесомого троса с учётом только нормальной составляющей полной гидродинамической силы; плоская задача о равновесии троса.

В [159] рассмотрены системы координат для гибкой связи; модель динамики гибких связей (уравнения динамики гибких связей и гидродинамические нагрузки в них); равновесие гибкой связи при установившемся движении ППС; линейная и нелинейная постановки задачи динамики ППС; задачи гидроупругости ППС (определение равновесия гибкой связи с учётом жёсткости на изгиб), движение двухзвенной ППС.

В [151] рассмотрены математические модели жидкой среды, основной математический аппарат, конформные и квазиконформные отображения, плоские и пространственные задачи, пространственные задачи о струях, неустановившиеся движения, вихри и взрывы.

В [319] рассмотрены задачи, связанные с определением проектных характеристик систем с оценкой функциональных возможностей СПА (задача о позиционировании СПА на течении и задача о рывке кабель-троса подводным аппаратом).

В [136] рассмотрены математические модели и методы расчётов параметров поведения в потоке устройств для буксировки аппаратуры при движении с постоянной скоростью, определены параметры неустойчивых режимов буксировки, расчёты параметров колебаний БС на волнении, расчёты параметров движения БС при маневрах судна.

В [11] рассмотрена механика плавающих тел — океанографических буев (гидродинамические силы, действующие на тела с ограниченным перемещением), механика буйрепов (статика и динамика), примеры океанографических буйковых станций (классификация, конструкция и элементы буйковых станций, специальные проблемы).

В [330] предложена математическая модель притопленной автономной буйковой станции (АБС), с помощью которой на основе экспериментальных данных об относительной скорости течения на ряде горизонтов в дискретные моменты времени предполагается восстановить геометрию АБС в эти моменты времени и оценить искажения, вносимые собственным движением АБС в показания скорости течения.

В [53] рассмотрены области применения плавучих объектов на якорях, общие сведения о системах удержания, якорные цепи и стальные проволочные канаты, статические уравнения равновесия плавучих сооружений на якорях, статические расчёты якорных систем в основных и особых случаях, приведены уравнения динамики плавучих сооружений на якорях.

Как видим, существует обширная литература, посвящённая изучению поведения ГС в различных средах. С появлением современной вычислительной техники возникла возможность развития и реализации ряда численных методов решения теоретических задач гидромеханики и математического моделирования, позволяющих глубоко исследовать вопросы их движения и динамики, как отмечают авторы [156], «всухую» с привлечением минимального объема эксперименталь-

ных данных. К настоящему времени многие задачи гидродинамики, возникающие в процессе создания разнообразных ППС, нашли свое законченное решение [14, 137, 145, 159].

В связи с увеличением рабочих глубин использования МПС возникает актуальность совершенствования теории и методов проектирования гибких связей МПС и ППС, уточнения существующих методик. Существующие методы расчёта и проектирования либо являются упрощёнными и не учитывают действительные нагрузки и характер нагружения гибких связей ППС, или являются довольно сложными и громоздкими для конструкторов-проектантов и требуют значительных затрат времени для их выполнения.

В табл. 3.4 приведен обзор по литературным источникам конструкций судовых устройств, имеющих в наличии гибкие связи (ГС), и математические модели, описывающие их работу.

В табл. 3.5 приведены математические модели, описывающие внешние воздействия на гибкие связи (ГС).

В табл. 3.6 приведены литературные источники, в которых описаны математические модели, описывающие внешние воздействия на гидротехнические сооружения.

В табл. 3.7 приведены литературные источники, в которых описаны математические модели, описывающие внешние воздействия на объекты, которые находятся на конце гибкой связи.

В табл. 3.8 приведены литературные источники, в которых описаны математические модели, описывающие конструкцию и усилия в парусе.

Таблица 3.4. Конструкция судовых устройств, имеющих в наличии гибкие связи (ГС), и математические модели, описывающие их работу

№ п/п	Вид устройства	Описание	Источник	№№ страниц
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1.	Якорное устройство (ЯУ)	Внешние воздействия на стоящее на якоре судно	Судовые устройства / М.Н. Александров, Ю.Д. Жуков, Г.С. Киров, А.С. Симоненко, Ю.А. Смирнов, А.Е. Чумак : Учебник. — Л.: Судостроение, 1982. — 320 с.	С. 194
2.		Статический и динамический расчёт основных элементов ЯУ		С. 197–200
3.	Швартовное устройство	Напряжения в натянутом и изогнутом тросе		С. 270
4.		Расчёт прочности троса		С. 270
5.	Буксирное устройство	Размеры буксирных тросов		С. 293
6.	Якорные системы удержания плавучих объектов	Области применения плавучих объектов на якорях	Кульмач П.П. Якорные системы удержания плавучих объектов (Вопросы статики и динамики плавучих сооружений на якорях). — Л.: Судостроение, 1980. 336 с. (Серия «Техника освоения океана»)	С. 15
7.		Одноточечные многоякорные плавучие рейдовые причалы		С. 50
8.		Рейдовые причалы на швартовных бочках, рейдовые стоянки		С. 55
9.		Статические уравнения равновесия плавучих сооружений на якорях		С. 144
10.		Статические расчёты якорных систем в основных случаях		С. 170–202
11.		Статические расчёты якорных систем в особых случаях		С. 217–249
12.		Рейдовые стоянки		С. 230
13.		Объекты точечного типа		С. 236
14.	Плавучие сооружения на якорях	Уравнения динамики плавучих сооружений на якорях		С. 250
15.		Уравнения динамики плавучих сооружений на якорях — к постановке задачи		С. 250
16.	Спуско-подъёмные устройства	Условия работы устройств, установленных на судне, не имеющем хода, и задачи их проектирования	Бугаенко Б.А., Магула В.Э. Специальные судовые устройства: Учебное пособие. — Л.: Судостроение, 1983. — 392 с.	С. 198
17.	Устройства для буксировки контейнеров с научной аппаратурой	Условия работы устройств для буксировки контейнеров с научной аппаратурой и задачи их проектирования		С. 211
18.		Динамические нагрузки при контакте контейнера с захватом устройства		С. 214
19.	Устройства передачи грузов	Особенности процессов передачи грузов и пересадки людей в открытом море. Классификация устройств		С. 222
20.		Конструкция устройств для передачи грузов контактным способом		С. 225
21.		Устройства для пересадки людей при контактном способе		С. 233

Продолжение таблицы 3.4

1	*2*	*3*	*4*	*5*
22.	Устройства передачи грузов	Устройства для бесконтактной передачи грузов кильватерным способом	Бугаенко Б. А., Магула В. Э. Специальные судовые устройства: Учебное пособие. — Л.: Судостроение, 1983. — 392 с.	С. 236
23.		Общая характеристика устройств траверзной передачи грузов		С. 239
24.		Конструкция устройств для передачи генеральных и жидких грузов траверзным способом		С. 240
25.	Методы расчета устройств передачи грузов	Расчетные задачи общего проектирования устройств передачи грузов		С. 248
26.		Вероятностная оценка количества ударов груза о палубу судна при волнении		С. 249
27.		Определение динамических нагрузок при посадке груза на палубу принимающего судна		С. 251
28.		Определение поперечного раскачивания груза в устройствах с вертикальным вспомогательным следящим канатом		С. 255
29.	Устройства для закрепления грузов	Классификация устройств для закрепления грузов, условия их работы		С. 343
30.		Общие сведения об устройствах для закрепления грузов; условия работы креплений		С. 343
31.		Усилия, действующие на грузы при качке судна на волнении		С. 344
32.	Средства передачи грузов в море	Выполнение динамических расчетов методами теоретической механики. Общие положения	Передача грузов в море. Справочник. / Горшков И. А., Махорин Н. И. — Л.: Судостроение, 1977. — 256 с .	С. 179
33.		Общие принципы выполнения динамического расчета		С. 180
34.		Динамика груза, подвешенного к крану на одном канате		С. 197
35.		Динамика груза, подвешенного к крану на двух канатах (бифилярный подвес)		С. 203
36.		Динамика груза, подвешенного к крану на трех канатах (трифилярный подвес груза)		С. 208
37.		Динамика канатных дорог		С. 210
38.		Выполнение динамических расчетов методами теории вероятностей. Общие положения		С. 220
39.		Порядок решения задач динамики с помощью теории стационарных случайных функций		С. 228

Продолжение таблицы 3.4

1	*2*	*3*	*4*	*5*
40.	Моделирование грузовых устройств	Моделирование грузовых устройств. Общие положения	Передача грузов в море. Справочник. / Горшков И.А., Махорин Н.И. — Л.: Судостроение, 1977. — 256 с .	С. 230
41.		Краткие сведения из теории подобия		С. 230
42.		Общий порядок моделирования		С. 230
43.	Судовые эластичные конструкции	Эластичные конструкции в современном судостроении	Магула В.Э. Судовые эластичные конструкции. — Л.: Судостроение, 1978. — 263 с.	С. 5
44.		Материалы судовых мягких конструкций		С. 6
45.		Прочность мягких материалов и их соединений		С. 19
46.		Физические соотношения для мягких материалов		С. 21
47.	Теория и методы расчёта мягких оболочек	Особенности судовых гибких конструкций		С. 28
48.		Геометрическая изгибаемость и классификация мягких оболочек		С. 35
49.		Уравнения равновесия мягких оболочек		С. 39
50.		Принципиальные схемы расчета мягких оболочек		С. 42
51.		Расчет мягких оболочек в складчатом состоянии		С. 47
52.		Расчёт мягких оболочек вращения при осесимметричных нагрузках		с. 62
53.		Расчет мягких оболочек плоского раскроя		С. 78
54.		Расчёт мягких геометрически изгибаемых цилиндрических оболочек		С. 81
55.		Расчёт изгибаемых цилиндрических оболочек под гидростатической нагрузкой		С. 86
56.		Расчет цилиндрических оболочек, обладающих изгибной жесткостью		С. 91
57.		Элементы динамики конструкций с мягкими оболочками		С. 95
58.	Динамические нагрузки, возникающие при подъеме объектов судовыми СПУ	Коэффициент динамичности усилий в грузовых канатах СПУ при подъеме плавучих объектов на борт судна	Бугаенко Б.А., Магула В.Э. Специальные судовые устройства: Учебное пособие. — Л.: Судостроение, 1983. — 392 с.	С. 61
59.		Особенности процесса подъема плавучего объекта в условиях волнения и основные расчетные задачи		С. 61
60.		Расчетная схема определения коэффициента динамичности при подъеме плавучего объекта		С. 63
61.		Коэффициент динамичности подъема плавучего груза		С. 73
62.		Численный метод расчета динамических усилий при подъеме плавучего объекта		С. 75
63.		Влияние установочного усилия на коэффициент динамичности подъема плавучего объекта		С. 78

Продолжение таблицы 3.4

1	*2*	*3*	*4*	*5*
64.	Динамические нагрузки, возникающие при подъеме объектов судовыми СПУ	Общие подходы вероятностного расчета коэффициента динамичности	Бугаенко Б.А., Магула В.Э. Специальные судовые устройства: Учебное пособие. — Л.: Судостроение, 1983. — 392 с.	С. 83
65.		Закон распределения коэффициента динамичности как функция случайного аргумента		С.84
66.		Определение закона распределения коэффициента динамичности методом имитационного моделирования		С. 90
67.	Расчетные нагрузки на конструкции СПУ	Расчетные нагрузки на конструкции СПУ с учетом вероятности их приложения		С. 93
68.		Нормативные требования к прочности СПУ автономных объектов		С. 93
69.		Определение расчетного коэффициента динамичности		С. 94
70.		Безрывковый подъем в условиях волнения		С. 99
71.	Загальна характеристика прив'язних підводних систем (ППС)	Склад і побудова ППС	Блінцов В.С., Магула В.Є. Проектний розрахунок зусиль у кабель-тросі прив'язної підводної системи: Навчальний посібник. — Миколаїв: УДМТУ, 1998. — 43 с.	С. 5
72.		Вплив параметрів КТ на характеристики ППС		С. 20
73.	Проектирование ППС	Обзор существующих ППС и областей их использования	Блинцов В.С. Привязные подводные системы. — Киев: Наукова думка, 1998. — 218 с.	С. 10
74.		Анализ подводных работ с применением ППС		С. 17
75.		Особенности проектирования ППС		С. 19
76.	Проектные задачи механики ППС	Постановка проектных задач механики ППС		С. 23
77.		Присоединенные массы элементов ППС		С. 29
78.		Уравнения динамики ППС		С. 51
79.		Зависимости теории подобия и размерностей для ППС в стационарном состоянии		С. 57
80.	Исследование ППС	Выбор и обоснование методов исследования ППС		С. 60
81.		Программные средства исследования стационарных состояний ППС		С. 62
82.		Программные средства исследования динамики ППС		С. 64
83.		Методика экспериментальных исследований ППС		С. 65
84.	Самоходные ППС с однозвенным кабель-тросом	Общая характеристика факторов, определяющих проектные характеристики самоходных ППС		С. 70

Продолжение таблицы 3.4

1	*2*	*3*	*4*	*5*
85.	Самоходные ППС с однозвенным кабель-тросом	Оценка влияния на характеристики ППС пространственности стационарной формы ее кабель-троса	Блинцов В. С. Привязные подводные системы. — Киев: Наукова думка, 1998. — 218 с.	С. 73
86.		Влияние на проектные характеристики ППС диаметра КТ		С. 75
87.		Влияние на проектные характеристики ППС длины КТ		С. 77
88.		Влияние на проектные характеристики ППС обтекаемости КТ		С. 84
89.		Влияние на проектные характеристики ППС плавучести кабель-троса		С. 85
90.		Влияние на проектные характеристики ППС обтекаемости аппарата		С. 86
91.		Зависимость проектных характеристик ППС от расчетной скорости потока		С. 87
92.		Связь между упорами движителей и положением ПА		С. 90
93.		Факторы, определяющие прочность кабель-троса однозвенных ППС		С. 93
94.		Влияние на натяжение КТ его диаметра и длины		С. 94
95.		Влияние на натяжение кабель-троса его обтекаемости		С. 100
96.		Влияние на натяжение кабель-троса плавучести и обтекаемости подводного аппарата		С. 101
97.		Влияние на натяжение кабель-троса условий эксплуатации		С. 102
98.		Расчетные нагрузки на кабель-трос при рывках		С. 106
99.	Расчёт усилий в якорной системе	Методика расчёта усилий в якорной системе (Владинец Г.И., Тимченко В.Л.)	Совершенствование судовых устройств и гибких конструкций. — Николаев: Сборник научных трудов НКИ, вып. 1988. — 101 с.	С. 68-71
100.	Боновые заграждения	Приближённый расчёт бонового заграждения (Романов В.Н)	Совершенствование судовых устройств и гибких конструкций. — Николаев: Сборник научных трудов НКИ, вып. 1987. — 99 с.	С. 39-41
101.	Траловая система	Схематизация траловой системы	Альтшуль Б. А., Фридман А. Л. Динамика траловой системы. — М.: Агропромиздат, 1990. — 240 с.	С. 13

Продолжение таблицы 3.4

1	*2*	*3*	*4*	*5*
102.	Динамика траловой системы	Математический аппарат исследования динамики траловых систем	Альтшуль Б. А., Фридман А. Л. Динамика траловой системы. — М.: Агропромиздат, 1990. — 240 с.	С. 23
103.	Стационарное движение ТС	Силы, действующие на ТС при ее стационарном движении		С. 28
104.		Математическое описание стационарного движения траловой системы с идеально гибким ваером		С. 33
105.		Математическое описание стационарного движения траловой системы с идеально жестким ваером		С. 48
106.		Влияние на характеристики движения траловой системы малого изменения ее проектных параметров, сравнение теоретических и экспериментальных результатов		С. 55
107.		Уравнения стационарного движения траловой системы при заданном натяжении в ваерах		С. 61
108.	Пространственное нестационарное движение траловой системы	Постановка задачи и основные допущения		С. 64
109.		Уравнения нестационарного движения траловой системы при заданных законах изменения скорости судна и длины вытравленного ваера		С. 69
110.		Уравнения нестационарного движения траловой системы при заданных законах изменения скорости судна и тяговых характеристик ваерной лебедки		С. 76
111.		Упрощение полученных уравнений и некоторые частные случаи пространственного движения траловой системы		С. 82
112.		Численное изучение пространственного движения траловой системы, результаты экспериментов		С. 88
113.	Плоское нестационарное движение траловой системы	Математические модели плоского движения траловой системы		С. 106
114.		Некоторые результаты численного изучения нестационарного движения траловых систем		С. 114
115.		Упрощение уравнений плоского движения траловой системы		С. 124
116.		Линеаризация уравнений движения траловой системы		С. 131
117.		Уравнения нестационарного движения траловой системы при заданном законе изменения натяжения в ваере		С. 138
118.		Математическая модель движения траловой системы, учитывающая упругие свойства вытравленного ваера		С. 140
119.		Сравнение результатов теоретического и экспериментального исследования нестационарного движения траловых систем		С. 148

Продолжение таблицы 3.4

1	*2*	*3*	*4*	*5*
120.	Теория движения и задачи проектирования траловых систем.	Анализ стационарных режимов движения траловой системы	Альтшуль Б.А., Фридман А.Л. Динамика траловой системы. — М.: Агропромиздат, 1990. — 240 с.	С. 153
121.		Анализ нестационарных режимов движения траловой системы		С. 159
122.		Расчет допустимого сопротивления трала при заданных энергетических характеристиках судна и ваерной лебедки		С. 174
123.		Расчет тяги траулера при заданных характеристиках трала и режимах его движения		С. 178
124.		Определение тягово-кинематических характеристик ваерной лебедки для реализации заданных режимов движения трала		С. 181
125.		Маневренность траловой системы при ее плоском движении		С. 192
126.	Применение теории движения к задачам управления траловыми системами	Задачи изменения глубины хода трала, решаемые с помощью уравнений стационарного движения		С. 196
		Постановка задач прицельного траления		С. 198
127.		Перевод трала на новый горизонт путем изменения длины вытравленного ваера и скорости судна		С. 213
128.		Проведение трала по заданной траектории		С. 219
129.	Подводные буксируемые системы	Нагрузки буксировки на тихой воде	Динамика подводных буксируемых систем / Поддубный В.И., Шамарин Ю.Е., Черненко Д.А., Астахов Л.С. — СПб: Судостроение, 1995. — 200 с.	С. 22
130.		Динамические нагрузки при спуско-подъемных операциях		С. 26
131.		Нестационарные режимы движения		С. 29
132.	Основные требования к судовым устройствам для буксировки аппаратуры	Обеспечение необходимой скорости и глубины хода аппаратуры		С. 31
133.		Прочность и надежность в эксплуатации		С. 33
134.		Выбор рациональной схемы буксировки		С. 37
135.	Основные элементы буксируемых систем	Тросовая часть		С. 39
136.		Устройства управления ходовыми параметрами буксируемой аппаратуры		С. 44
137.		Длинномерные носители аппаратуры		С. 45
138.	Спуско-подъемные устройства буксируемых систем	Общая характеристика судовых спуско-подъемных устройств		С. 46
139.		Конструктивные особенности спуско-подъемных устройств		С. 47
140.		Ограничения на параметры буксируемых систем в части возможностей проведения спуско-подъемных операций		С. 51

Продолжение таблицы 3.4

1	*2*	*3*	*4*	*5*
141.	Расчеты параметров движения буксируемых систем при маневрах судна	Расчеты параметров движения на прямом курсе с переменной скоростью	Динамика подводных буксируемых систем / Поддубный В. И., Шамарин Ю. Е., Черненко Д. А., Астахов Л. С. — СПб: Судостроение, 1995. — 200 с.	С. 155
142.		Расчеты параметров движения при переходе с прямого курса на циркуляцию и наоборот		с. 159
143.		Управляемые движения буксируемых систем		С. 168
144.		Переход от режима буксировки к работе на стопе		С. 171
145.	Устройства стабилизации буксируемых систем	Стабилизирующие устройства носителей аппаратуры		С. 172
146.		Стабилизация длинномерных носителей аппаратуры		С. 173
147.		Виброзащита от возмущений качки судна		С. 175
148.		Динамическое гашение возмущений качки судна		С. 177
149.	Экспериментальные исследования	Лабораторные установки и модели		С. 178
150.		Измерительная аппаратура		С. 182
151.		Методика исследований в опытовых бассейнах, гидролотках и аэродинамических трубах		С. 183
152.		Методики проведения натурных и полунатурных испытаний		С. 184
153.	Подводные буксируемые системы	Требования, предъявляемые к буксируемым системам	Иконников И. Б. и др. Подводные буксируемые системы и буи нейтральной плавучести. — СПб.: Судостроение, 1992. — 224 с. (Серия «Техника освоения океана»)	С. 5
154.		Основные параметры пространственных буксируемых систем и их влияние на формирование пространственно-временных характеристик измерительных систем		С. 6
155.		Традиционные и перспективные конструктивные гидродинамические схемы буксировки измерительных антенн и принципы их построения		С. 11
156.	Динамика движения подводных буксируемых систем	Основные кинематические и динамические зависимости движения подводных буксируемых систем		С. 20
157.		Особенности динамики движения ПБС		С. 67
158.	Проектирование подводных БС	Порядок выполнения работы		С. 99
159.		Предварительный расчёт основных параметров ПБС		С. 100
160.		Гидродинамический расчёт отводящей системы		С. 105
161.		Проверочный гидродинамический расчёт рабочей ветви буксира		С. 109
162.		Гидродинамический расчёт углубляющей системы		С. 111

Продолжение таблицы 3.4

1	*2*	*3*	*4*	*5*
163.	Проектирование подводных БС	Поверочный гидродинамический расчёт ПБС	Иконников И.Б. и др. Подводные буксируемые системы и буи нейтральной плавучести. — СПб.: Судостроение, 1992. — 224 с. (Серия «Техника освоения океана»)	С. 113
164.	Буи нейтральной плавучести	Общие сведения		С. 118
165.		Результаты теоретических исследований		С. 122
166.		Инженерные разработки		С. 131
167.		Опыт эксплуатации		С. 133
168.		Общие требования к дрейфующим буям нейтральной плавучести. Разработка перспективных буёв		С. 136
169.	Проектирование буёв нейтральной плавучести	Особенности задачи проектирования БНП		С. 185
170.		Системный подход к задаче проектирования САСГ		С. 187
171.		Типовые расчёты при проектировании БНП		С. 206
172.		Перспективные проектные решения в области САСГ БНП		С. 212
173.	Висячие системы (устройства траверзной передачи жидких грузов)	О влиянии длины несущей нити на провесы одного из видов висячих систем (Немиров Б.С.)	Судовые гибкие конструкции. — Сборник научных трудов, вып. 63. — Николаев, НКИ, 1972. — 141 с.	С. 96–99
174.	Якорное устройство	Некоторые вопросы динамики судна на якоре (Поздеев В.А.)		С. 104-112
175.		К расчёту якорной системы бурового судна (Семенченко А.Н.)		С. 113-117
176.	Математическая модель динамики привязной подводной системы	Системы координат	Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики /Виноградов Н.И., Гутман М.Л., Лев И.Г., Нисевич М.З. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2000. — 324 с.	
177.	Задачи установившегося движения ППС	Оптимизация параметров равновесия привязных подводных систем		С. 74
178.		Оптимизационная задача глубина-натяжение		С. 75
179.		Оптимизация расположения двух отводителей		С. 77
180.		Пространственное равновесие привязных подводных систем при циркуляции		С. 105
181.	Задачи динамики ППС	Линейная модель динамики привязной подводной системы		С. 168
182.		О воздействии качки и рыскания судна на привязную подводную систему		С. 174

Окончание таблицы 3.4

1	*2*	*3*	*4*	*5*
183.	Задачи динамики ППС	Метод псевдоспектра	Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики / Виноградов Н.И., Гутман М.Л., Лев И.Г., Нисевич М.З. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2000. — 324 с.	С. 175
184.		Учет суммарного воздействия различных видов качки судна		С. 176
185.		Практическое использование авто-и взаимно корреляционных функций		С. 178
186.		Случай сравнения расчетных и экспериментальных параметров качки привязной подводной системы		С. 179
187.		Реакция привязной подводной системы на управляющие воздействия		С. 185
188.		Движение двухзвенной привязной подводной системы		С. 201
189.		Диаграмма допустимых режимов использования привязных подводных систем		С. 211
190.		Гидродинамика привязных подводных систем при маневрировании судна-буксировщика		С. 213
191.		Поведение ППС при остановке судна и при скорости. Поворот судна-буксировщика на 90°. Поворот на обратный галс		С. 214
192.		Маневрирование судна-буксировщика с трубным ставом		С. 221
193.	Задачи экспериментальной отработки ППС	Проверка адекватности математической модели ППС с помощью математической теории планирования эксперимента. Теоретические положения		С. 290
194.		Некоторые практические результаты		С. 295
195.		Статистический подход к оценке динамических параметров буксируемых ППС. О рациональном формулировании технических требований по стабильности хода буксируемых устройств		С. 300
196.		Основные особенности характеристик нестабильности хода привязных подводных аппаратов как случайных функций времени		С. 302
197.		Оценка среднеквадратичных отклонений параметров хода по экспериментальной реализации		С. 304
198.		Метод оценки боковых смещений кормы судна-буксировщика		С. 306

Таблица 3.5. Математические модели, описывающие внешние воздействия на гибкие связи (ГС)

№ п/п	Вид воздействия	Описание	Источник	№№ страниц
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1.	Морское волнение	Ветровое волнение (корреляционные функции и энергетические спектры)	Судовые устройства / М. Н. Александров, Ю. Д. Жуков, Г. С. Киров, А. С. Симоненко, Ю. А. Смирнов, А. Е. Чумак : Учебник. — Л.: Судостроение, 1982. — 320 с.	С. 8
2.		Волны зыби		С. 11
3.		Корабельные волны		С. 11
4.		Качка судна		С. 13
5.		Гидродинамические силы		С. 16
6.		Гидродинамические силы, действующие на тела, движущиеся у поверхности воды		С. 20–21
7.		Влияние заглубления объекта на гидродинамические силы		С. 21–22
8.		Влияние твёрдой стенки на гидродинамические силы		С. 22–23
9.		Гидродинамические силы, возникающие при подъёме объекта из воды		С. 23–24
10.		Гидродинамические силы при ударе объекта о воду		С. 24–26
11.		Особенности вероятностного подхода к расчёту судовых устройств в динамических режимах		С. 30–33
12.		Гидродинамические силы, возникающие при взаимодействии ГС с потоком жидкости		С. 71–74
13.	Тела с ограниченным перемещением	Гидродинамические силы, действующие на тела с ограниченным перемещением	Берто Г. О. Океанографические буи: Пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1979. — 215 с. (Серия: «Техника освоения океана»)	С. 9
14.		Силы, обусловленные постоянными течениями		С. 9–14
15.		Тела, плавающие на поверхности		С. 14–18
16.		Тела, плавающие на поверхности — выражение для надводного сопротивления		С. 15
17.		Модельные испытания		С. 18
18.		Силы, обусловленные волнением		С. 18
19		Инерционная сила, действующая на неподвижное тело		С. 19
20.		Сила сопротивления, действующая на неподвижное тело		С. 19
21.		Силы и моменты, обусловленные плоскими волнами		С. 20–21
22.		Постоянные течения (допущения, действующие силы, гидродинамическое сопротивление)		С. 34–37

Продолжение таблицы 3.5

1	*2*	*3*	*4*	*5*
23.	Плавучие сооружения на якорях	Некоторые вопросы динамики — гидродинамическое воздействие воды	Кульмач П. П. Якорные системы удержания плавучих объектов (Вопросы статики и динамики плавучих сооружений на якорях). — Л.: Судостроение, 1980. — 336 с. (Серия «Техника освоения океана»)	С. 299
24.	Буксируемые системы	Гидродинамические силы, действующие на элементы буксируемой системы (БС) при их движении: полная гидродинамическая сила, полный гидродинамический мормент и составляющие. Оси координат	Егоров В. И. Подводные буксируемые системы: Учебное пособие. — Л.: Судостроение, 1981. — 304 с.	С. 37
25.		Основные формулы для составляющих полной гидродинамической силы *R* и полного гидродинамического момента *M*. Гидродинамические коэффициенты		С. 41
26.		Определение гидродинамических коэффициентов. Понятие о подобии. Критерии подобия		С. 47
27.	Гидростатический и гидродинамический расчёт буёв	Гидростатический расчёт буя		С. 173
28.		Гидродинамический расчёт буя		С. 184
29.	Внешние воздействия на судовые устройства	Система координат	Бугаенко Б. А., Магула В. Э. Специальные судовые устройства: Учебное пособие. — Л.: Судостроение, 1983. — 392 с.	С. 36
30.		Морское волнение		С. 38
31.		Влияние экранирующего эффекта корпуса судна на волнение у борта. Изменение параметров волнения на глубине		С. 42
32.	Устройства для опускания НАПА	Учёт сопротивления воды движению контейнера при колебаниях его в толще воды		С. 204
33.		Влияние волнения на натяжение в кабель-тросе при подъёме контейнера у поверхности воды и в шахте		С. 206
34.	Внешние воздействия в спуско-подъёмных операциях	Общая характеристика внешних сил и кинематических возбуждений	Бугаенко Б. А. Динамика судовых спуско-подъёмных операций. — Киев: Наукова думка, 2004. — 320 с.	С. 13
35.		Системы координат		С. 14
36.		Гидродинамические силы		С. 16
37.		Гидродинамические силы при расположении поднимаемого объекта в безграничной жидкости		С. 17

Продолжение таблицы 3.5

1	*2*	*3*	*4*	*5*
38.	Внешние воздействия в спуско-подъёмных операциях	Гидродинамические силы при расположении поднимаемого объекта вблизи свободной поверхности и у твердых стенок	Бугаенко Б.А. Динамика судовых спуско-подъёмных операций. — Киев: Наукова думка, 2004. — 320 с.	С. 22
39.		Гидродинамические силы при расположении объекта на свободной поверхности		С. 27
40.		Гидродинамические силы при подъеме объекта со свободной поверхности жидкости		С. 31
41.		Волнение как источник воздействий при проведении спуско-подъемных операций. Ветровое волнение		С. 36
42.		Другие виды волнения		С. 41
43.		Изменение характеристик волнения при преодолении различного рода преград и на глубине		С. 43
43.		Качка судна-носителя СПУ и плавучих объектов		С. 47
44.		Качка изолированного судна		С. 47
45.		Кинематические характеристики колебаний фиксированной на судне точки		С. 48
46.		Внешние воздействия, создаваемые приводами механизмов СПУ: электропривод, гидропривод		С. 52–57
47.		Силы сопротивления и их линеаризация		С. 57
48.	Динамические нагрузки на канаты (кабель-тросы) неавтономных объектов, опускаемых в воду	Расчетная схема подъема неавтономных объектов с вертикальным канатом (без образования слабины в нем) при гармонических колебаниях верхнего конца каната		С. 103
49.		Численный анализ двух случаев подъема неавтономных объектов		С. 110
50.		Перемещения и усилия в вертикальном канате подъема неавтономных объектов при рывке верхнего конца. Жесткое закрепление каната на судне. Упругое закрепление каната на судне		С. 114–124
51.		Скорость движения точки крепления каната на судне относительно объекта в начальный момент рывка		С. 124
52.		Вероятностный расчет динамических усилий в канате при рывках		С. 128
53.		Отрыв объекта от грунта: отрывное сопротивление и отрывная нагрузка, усилия в канатах при отрыве объекта от грунта, оценка усилий, возникающих в канатах при колебаниях судна до отрыва объекта от грунта		С. 134–139
54.		Усилия в наклонных кабель-буксирах как нагрузка на СПУ		С. 140
55.		Определение усилия в кабель-буксире численным методом в квазистатической постановке		С. 141
56.		Динамические усилия в кабель-буксире при качке судна		С. 144

Продолжение таблицы 3.5

1	*2*	*3*	*4*	*5*
57.	Внешние нагрузки на сооружения морского шельфа	Скорость ветра	Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа. Пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1986. — 288 с. (Серия «Техника освоения океана»)	С. 78
58.		Ветровые нагрузки		С. 89
59.		Морские волны: теория волн Эри, теория волн Стокса, теория кноидальных волн		С. 84–92
60.		Области применимости волновых теорий		С. 96
61.		Волновые нагрузки на вертикальные колонны: нагрузки от волн Эри, нагрузки от волн Стокса, нагрузки от кноидальных волн, эффекты относительного движения		С. 97–106
62.		Максимальные волновые нагрузки на морское гидротехническое сооружение		С. 110
63.		Приведение волновых нагрузок к узловым		С. 114
64.		Силы поддержания		С. 118
65.		Нагрузки от течения		С. 122
66.		Дополнительные внешние нагрузки		С. 123
67.	Дія зовнішніх сил на елементи ППС	Гідродинамічні сили, діючі на КТ	Блінцов В.С., Магула В.Є. Проектний розрахунок зусиль у кабель-тросі прив'язної підводної системи: Навчальний посібник. — Миколаїв: УДМТУ, 1998. — 43 с.	С. 21
68.		Гідростатичні сили, діючі на КТ та гідродинамічний опір ПА		С. 25–26
69.	Проектные и эксплуатационные задачи механики ППС	Особенности гидрометеорологической обстановки в районе работ ППС	Блинцов В.С. Привязные подводные системы. — Киев: Наукова думка, 1998. — 218 с.	С. 25
70.		Гидростатические нагрузки, действующие на элементы ППС.		С. 27
71.		Гидродинамические нагрузки, действующие на ПА		С. 30
72.		Гидродинамические нагрузки, действующие на кабель-трос		С. 38
73.	Подводные буксируемые системы	Физические свойства морской среды	Динамика подводных буксируемых систем / Поддубный В.И., Шамарин Ю.Е., Черненко Д.А., Астахов Л.С. — СПб: Судостроение, 1995. — 200 с.	С. 18
74.		Воздействие морского волнения		С. 24

Окончание таблицы 3.5

1	*2*	*3*	*4*	*5*
75.	Гидродинамические силы, действующие на элементы буксируемых систем	Методы решения задач гидроупругости	Динамика подводных буксируемых систем / Поддубный В.И., Шамарин Ю.Е., Черненко Д.А., Астахов Л.С. — СПб: Судостроение, 1995. — 200 с.	С. 52
76.		Моделирование гидродинамических нагрузок на элемент троса		С. 56
77.		Коэффициенты гидродинамического сопротивления гибких связей в потоках		С. 59
78.		Составляющие гидродинамической силы и гидродинамического момента буксируемого носителя аппаратуры		С. 60
79.		Критерии подобия. Определение гидродинамических коэффициентов		С. 62
80.	Расчеты параметров устройств для буксировки аппаратуры при движении с постоянной скоростью	Движение на прямом курсе		С. 79
81.		Движение на циркуляции		С. 87
82.		Буксировка носителя аппаратуры с помощью двух тросов		С. 92
83.	Определение параметров неустойчивых режимов буксировки	Исследование устойчивости движения буксируемой системы на тихой воде		С. 98
84.		Устойчивость движения буксируемых систем на волнении		С. 105
85.		Устойчивость движения длинномерных носителей аппаратуры		С. 110
86.	Равновесие подводных буксируемых систем при их движении в воде	Позиционные и гидродинамические силы и моменты, действующие на подводные буксируемые системы при установившемся движении	Иконников И.Б., Гаврилов В.М., Пузырев Г.В. Подводные буксируемые системы и буи нейтральной плавучести. — СПб.: Судостроение, 1992. — 224 с. (Серия «Техника освоения океана»)	С. 14
87.	Динамика движения подводных буксируемых систем	Гидродинамические силы и моменты инерционной природы		С. 38
88.		Расчёт присоединённых масс		С. 45
89.		Силы тяжести и водоизмещения		С. 57
90.	Математическая модель динамики привязной подводной системы	Гидродинамические нагрузки на гибкие связи	Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики / Виноградов Н.И., Гутман М.Л., Лев И.Г., Нисевич М.З. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2000. — 324 с.	С. 35
91.		Об учете гидростатической нагрузки на гибкие связи		С. 46
92.		Граничные условия		С. 47

Таблица 3.6. Математические модели, описывающие внешние воздействия на гидротехнические сооружения

№ п/п	Вид воздействия	Описание	Источник	№№ страниц
1.	Методы статического расчёта гидротехнических сооружений	Расчетные воздействия окружающей среды	Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа. Пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1986. — 288 с.	С. 129
2.		Расчеты стальных сооружений морского шельфа как рамных систем		С. 130
3.		Увеличение напряжений, обусловленное продольным изгибом		С. 137
4.		Напряжения в стальных цилиндрических элементах от наружного давления: свободный цилиндрический элемент, закреплённый цилиндрический элемент		С. 141–149
5.		Критерий прочности для стальных элементов		С. 150
6.		Оценка влияния динамического характера воздействий		С. 185
7.	Расчёт оснований гидротехнических сооружений	Характеристика грунта		С. 195
8.		Сваи для сооружения ферменного типа		С. 197
9.		Определение несущей способности сваи при действии осевых нагрузок		С. 199
10.		Упругая реакция свай на осевую нагрузку		С. 204
11.		Реакция сваи на циклическую горизонтальную нагрузку		С. 207
12.	Расчёт фундаментов гидротехнических сооружений	Фундаменты гравитационных сооружений морского шельфа		С. 218
13.		Несущая способность фундаментов		С. 219
14.		Сопротивление фундамента скольжению		С. 221
15.		Расчет фундамента на нагрузки общего типа		С. 221
16.		Упругая реакция основания		С. 225
17.		Осадка фундамента		С. 228
18.	Динамика сооружений морского шельфа	Приведение волнового воздействия к узловым нагрузкам		С. 235
19.		Уравнения динамики		С. 240
20.		Расчеты напряжений		С. 256
21.		Динамическая реакция на нерегулярные волны		С. 260
22.		Реакция сооружения на сейсмические воздействия		С. 266

Таблица 3.7. Математические модели, описывающие внешние воздействия на объекты, которые находятся на конце ГС

№ п/п	Вид воздействия	Описание	Источник	№№ страниц
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1.	Контакт объектов в спуско-подъемных операциях	Проблема первоначального контакта в спуско-подъемных операциях. Общие вопросы. Общая характеристика проблемы	Бугаенко Б.А. Динамика судовых спуско-подъёмных операций. — Киев: Наукова думка, 2004. — 320 с.	С. 147
2.		Явление удара: удар двух тел, общий случай удара, качественный анализ контакта при спуско-подъемных операциях, удар о жидкость		С. 148–153
3.	Общие подходы к определению ударных нагрузок	Энергетический подход		С. 154
4.		Двухмассовая система с упругим элементом между массами		С. 156
5.		Численные методы решения		С. 157
6.	Равновесие подводных буксируемых систем при их движении в воде	Равновесие и статическая устойчивость буксируемых аппаратов	Иконников И.Б., Гаврилов В.М., Пузырев Г.В. Подводные буксируемые системы и буи нейтральной плавучести. — СПб.: Судостроение, 1992. — 224 с. (Серия «Техника освоения океана»)	С. 18
7.	Динамика движения подводных буксируемых систем	Демпфирующие гидродинамические силы и моменты, соответствующие вращательному движению буксируемого аппарата		С. 28
8.		Расчёт вращательных производных		С. 32
9.		Уравнения продольного и бокового возмущенных движений буксируемого аппарата		С. 71
10.		Продольное возмущённое движение буксируемого аппарата. Анализ результатов исследования продольной устойчивости и управляемости		С. 81
11.		Числовой пример расчёта продольной устойчивости собственного возмущённого движения буксируемого аппарата		С. 92
12.		Боковое возмущённое движение буксируемого аппарата		С. 96
13.	Математическая модель динамики привязной подводной системы	Системы координат. Системы координат для подводного аппарата	Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики / Виноградов Н.И., Гутман М.Л., Лев И.Г., Нисевич М.З. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2000. — 324 с.	С. 14
14.		Модель динамики подводного аппарата. Уравнения динамики подводного аппарата		С. 20
15.		Об учете потенциальных составляющих в моментных гидродинамических характеристиках подводного аппарата		С. 26

Окончание таблицы 3.7

1	*2*	*3*	*4*	*5*
16.	Задачи установившегося движения ППС	Пространственное равновесие привязного подводного аппарата и гибкой связи при прямолинейном движении	Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики / Виноградов Н.И., Гутман М.Л., Лев И.Г., Нисевич М.З. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2000. — 324 с.	С. 57
17.		Равновесие подводного аппарата		С. 58
18.		Эффекты проявления гидродинамической несимметрии привязных подводных аппаратов и гибких связей		С. 67
19		Движение привязного подводного аппарата		С. 84
20.		Придонная буксировка привязного подводного аппарата на заданном расстоянии от дна		С. 89
21.		Равновесие многосвязных систем		С. 97
22.		Установившееся движение двухмодульной привязной подводной системы		С. 99
23.		Равновесие подводного аппарата при циркуляции		С. 105
24.	Задачи динамики ППС	Линейная модель динамики привязного подводного аппарата		С. 138
25.		Движение привязного подводного аппарата вблизи взволнованной поверхности моря		С. 189
26.	Задачи экспериментальной отработки ППС	Регулировка привязных подводных аппаратов на стопе		С. 278
27.		Регулировка хода буксируемого привязного подводного аппарата по крену и дифференту в процессе натурных испытаний		С. 283
28.		Определение гидродинамических характеристик привязных подводных аппаратов и гибких связей по данным натурных испытаний		С. 285

Таблица 3.8. Математические модели, описывающие конструкцию и усилия в парусе

№ п/п	Вид воздействия	Описание	Источник	№№ страниц
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1.	Внутренние усилия в парусе	Расчёт распределения внутренних усилий в парусе (Белоусов В. Н.)	Совершенствование судовых устройств и гибких конструкций. — Николаев: Сборник научных трудов НКИ, вып. 1988. — 101 с.	С. 49–51
2.	Судовые эластичные конструкции	Эластичные конструкции в современном судостроении	Магула В.Э. Судовые эластичные конструкции. — Л.: Судостроение, 1978. — 263 с.	С. 5
3.		Материалы судовых мягких конструкций		С. 6
4.		Прочность мягких материалов и их соединений		С. 19
5.		Физические соотношения для мягких материалов		С. 21
6.	Теория и методы расчёта мягких оболочек	Особенности судовых гибких конструкций		С. 28
7.		Геометрическая изгибаемость и классификация мягких оболочек		С. 35
8.		Уравнения равновесия мягких оболочек		С. 39
9.		Принципиальные схемы расчета мягких оболочек		С. 42
10.		Расчет мягких оболочек в складчатом состоянии		С. 47
11.		Расчёт мягких оболочек вращения при осесимметричных нагрузках		с. 62
12.		Расчет мягких оболочек плоского раскроя		С. 78
13.		Расчёт мягких геометрически изгибаемых цилиндрических оболочек		С. 81
14.		Расчёт изгибаемых цилиндрических оболочек под гидростатической нагрузкой		С. 86
15.		Расчет цилиндрических оболочек, обладающих изгибной жесткостью		С. 91
16.		Элементы динамики конструкций с мягкими оболочками		С. 95

Приведём процесс разработки математической модели динамики ГС МПС на примере ПБС, учитывая существующие, т. е. уже разработанные динамические модели [430].

Требования к математической модели [392, с. 6]**.**

1. Должна учитывать движение судна-носителя (СН), которое определяется следующими факторами:

– волнение поверхности моря;

– кинематические характеристики движения СН без учёта волнения поверхности моря;

– скорость морского течения.

2. Должна учитывать особенности конструкции ГС, влияющие на функциональные характеристики МПС и определяемые следующими факторами:

– длиной и изменением длины ГС в процессе движения СН;

– упругими и прочностными характеристиками ГС;

– положительной или отрицательной плавучестью ГС, а также грузов, поплавков и буев, связанных с ГС;

– силами гидродинамического сопротивления ГС в процессе её движения в воде;

– изгибной и крутильной жёсткостью ГС относительно её оси;

– силами, действующими на коренной и ходовой конец ГС.

3. Должна учитывать движение подводного аппарата (ПА), которое определяется следующими факторами:

– массой и плавучестью ПА;

– относительным расположением ПА по отношению к СН и кинематическими характеристиками его движения;

– силами гидродинамического сопротивления ПА в процессе его движения в воде.

4. Должна учитывать влияние преград на пути движения ПА и ГС, которое определяется следующими факторами:

– расположением преград в воде;

– размерами преград;

– кинематическими характеристиками движения преград.

Параметры, необходимые для выполнения математического моделирования динамики МПС [392, с. 7]**.**

1. Амплитуда, длина и скорость гармонических волн на поверхности моря.

2. Координаты вектора скорости СН в зависимости от времени.

3. Координаты вектора скорости морского течения.

4. Максимальная длина ГС.

5. Скорость вытравливания или выборки ГС лебёдкой СН.

6. Коэффициент (модуль) упругости ГС на растяжение в каждой её точке.

7. Моменты инерции изгиба и кручения поперечного сечения ГС (жёсткости изгиба и кручения).

8. Допустимые силы (или напряжения) растяжения ГС в каждой её точке.

9. Координаты и массы грузов, закреплённых на ГС.

10. Координаты и плавучесть поплавков и буёв, закреплённых на ГС.
11. Коэффициенты гидродинамического сопротивления ГС.
12. Линейная плотность ГС.
12. Масса, плавучесть, коэффициенты гидродинамического сопротивления и вектор скорости ПА по отношению к неподвижной воде в зависимости от времени.
13. Координаты преград в воде.
14. Размеры и масса преград.
15. Координаты скорости движения преград.
16. Глубина моря.

Характеристики МПС, которые определяются с помощью математической модели.

1. Силы, действующие на коренной и ходовой конец ГС.
2. Длина ГС.
3. Относительное растяжение ГС.
4. Координаты ПА по отношению к СН.
5. Форма ГС в зависимости от времени.
6. Распределение сил и напряжений растяжения, изгиба и кручения по длине ГС.

Упрощающие предположения, используемые в процессе математического моделирования динамики МПС.

1. Форма и размеры СН и ПА не изменяются.
2. Длина ГС намного больше, чем размеры СН и ПА, поэтому СН и ПА можно считать материальными точками.
3. Материал ГС можно считать абсолютно упругим (с линейным законом упругости).
4. Толщина (диаметр) ГС намного меньше её длины.
5. Преграды на пути движения МПС можно считать абсолютно твёрдыми.
6. Морское течение в моделируемой области моря стационарное.
7. Обтекание ГС потоком воды происходит без образования вихрей Кармана.
8. Скорость вытравливания или выборки ГС лебёдкой СН намного меньше скорости волн в ГС.

Параметры математической модели.

Система уравнений (1)–(9) зависит от следующих параметров, характеризующих свойства ГС и внешних воздействий на неё.

Математическая модель динамики элемента ГС определена системой уравнений [37, 38]:

$$\ddot{x}_1 = f_{1X}(x_1, y_1, z_1, \frac{\partial x_1}{\partial t}, \frac{\partial y_1}{\partial t}, \frac{\partial z_1}{\partial t}), \quad (1)$$

$$\ddot{y}_1 = f_{1Y}(x_1, y_1, z_1, \frac{\partial x_1}{\partial t}, \frac{\partial y_1}{\partial t}, \frac{\partial z_1}{\partial t}), \quad (2)$$

$$\ddot{z}_1 = f_{1Z}(x_1, y_1, z_1, \frac{\partial x_1}{\partial t}, \frac{\partial y_1}{\partial t}, \frac{\partial z_1}{\partial t}), \quad (3)$$

$$\ddot{x}_2 = f_{1X}(x_1, y_1, z_1, \frac{\partial x_1}{\partial t}, \frac{\partial y_1}{\partial t}, \frac{\partial z_1}{\partial t}) + f_{2X}(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \frac{\partial x_2}{\partial t}, \frac{\partial y_2}{\partial t}, \frac{\partial z_2}{\partial t}), \quad (4)$$

$$\ddot{y}_2 = f_{1Y}(x_1, y_1, z_1, \frac{\partial x_1}{\partial t}, \frac{\partial y_1}{\partial t}, \frac{\partial z_1}{\partial t}) + f_{2Y}(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \frac{\partial x_2}{\partial t}, \frac{\partial y_2}{\partial t}, \frac{\partial z_2}{\partial t}), \quad (5)$$

$$\ddot{z}_2 = f_{1Z}(x_1, y_1, z_1, \frac{\partial x_1}{\partial t}, \frac{\partial y_1}{\partial t}, \frac{\partial z_1}{\partial t}) + f_{2Z}(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \frac{\partial x_2}{\partial t}, \frac{\partial y_2}{\partial t}, \frac{\partial z_2}{\partial t}), \quad (6)$$

$$d\ddot{\varphi}_x = f_{\varphi X}(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \frac{\partial x_2}{\partial t}, \frac{\partial y_2}{\partial t}, \frac{\partial z_2}{\partial t}, d\varphi_x), \quad (7)$$

$$d\ddot{\varphi}_y = f_{\varphi Y}(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \frac{\partial x_2}{\partial t}, \frac{\partial y_2}{\partial t}, \frac{\partial z_2}{\partial t}, d\varphi_y), \quad (8)$$

$$d\ddot{\varphi}_z = f_{\varphi Z}(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \frac{\partial x_2}{\partial t}, \frac{\partial y_2}{\partial t}, \frac{\partial z_2}{\partial t}, d\varphi_z). \quad (9)$$

Правые части уравнений (1)–(9) являются функциями от искомых переменных и их производных по времени.

ρ_{0l} — плотность единицы длины ГС без растяжения, кг/м. Если ГС однородная по длине, тогда ρ_{0l} задаётся числовым значением, а если ρ_{0l} зависит от координаты s вдоль длины ГС, тогда задаётся функцией, определяющей наличие на ГС дополнительных грузов, уменьшающих плавучесть ГС, или поплавков, увеличивающих плавучесть ГС.

ρ — плотность жидкости, кг/м^3.

l_0 — начальная длина ГС без нагрузки, м.

N — количество элементов ГС на длине l_0.

ds_0 — начальная длина элемента ГС без нагрузки, м, $ds_0 = \frac{l_0}{N}$.

d_0 — диаметр ГС без нагрузки, м.

Если ГС постоянного диаметра по длине, тогда d_0 задаётся числовым значением, а если d_0 зависит от координаты s вдоль длины ГС, тогда задаётся функцией.

E — модуль упругости Юнга материала ГС, Па. Задаётся числовым значением, а если E зависит от координаты s вдоль длины ГС, тогда задаётся функцией.

G^* — модуль сдвига материала ГС, Па. Задаётся числовым значением, а если G^* зависит от координаты s вдоль длины ГС, тогда задаётся функцией.

M_a — масса жидкости, присоединённая к единице длины ГС, кг/м.

C_τ — тангенциальный коэффициент гидродинамического сопротивления ГС.

C_n — нормальный коэффициент гидродинамического сопротивления ГС.

f_G — коэффициент трения скольжения ГС о преграду в воде.

g — ускорение свободного падения тел на уровне поверхности моря, м/с^2.

$T_{\max}$ — максимальная допустимая сила растяжения ГС, превышение которой приводит к необратимым изменениям её функциональных качеств, Н.

t_m — физическое время моделирования динамики ГС ($t \le t_m$), с.

Функции внешних воздействий на ГС.

V_x, V_y, V_z — координаты вектора скорости морского течения, м/с. Могут быть константами или функциями координат x, y, z, если течение в рассматриваемой акватории неоднородное.

G_x, G_y, G_z — координаты вектора внешней силы, Н/м. Определяют силовое воздействие внешнего объекта на ГС. В частности, могут быть использованы для учёта движения ПА.

В этом случае величины G_x, G_y, G_z, заданные на ходовом конце ГС, служат координатами равнодействующей сил тяги движителя и гидродинамического сопротивления ПА, а масса ПА равна массе первого элемента ГС. Аналогичным образом величины G_x, G_y, G_z могут быть заданы на коренном конце и моделировать равнодействующую сил тяги движителя и сопротивления СН.

$f_{\text{bar}}(t,x,y,z) < 0$ — ограничение, задающее положение подводной преграды, в качестве которой могут быть элементы рельефа морского дна и находящихся на нём объектов или плавающий подводный объект, определённый только геометрией и кинематическими характеристиками.

$z_N = f_N(t)$ — изменение вертикальной координаты СН под действием морского волнения.

Разработка математической модели. Существуют две основные группы математических моделей, используемых для описания динамики ГС в потоках жидкости. В первую из них входят модели, в основе которых лежат дифференциальные уравнения в частных производных [22, 62, 85]. Вторая группа моделей основана на представлении ГС в виде последовательно соединённых между собой достаточно большого количества дискретных упругих стержней [14, 152, 136, 137]. Вторая модель по сравнению с первой является приближённой, но если количество стержней стремится к бесконечности, то они совпадают.

Подводная буксируемая система (ПБС) как разновидность МПС состоит из судна-носителя (СН), подводного аппарата (ПА) и соединяющей их гибкой связи (ГС) (рис. 3.13) [391, с. 21].

Введём правую систему координат $0xyz$. Оси $0x$ и $0y$ лежат в плоскости поверхности моря, а ось $0z$ совпадает с направлением вектора силы тяжести **q**. Коренной конец ГС закреплён на СН и имеет координаты $X_{\text{сн}}$, $Y_{\text{сн}}$, $Z_{\text{сн}}$. Ходовой конец ГС закреплён на ПА и имеет координаты $X_{\text{па}}$, $Y_{\text{па}}$, $Z_{\text{па}}$. Скорость СН задана вектором $\mathbf{V}_{\text{сн}}$, а ПА вектором $\mathbf{V}_{\text{па}}$. Движение ПА также может быть задано вектором силы тяги его движителя. Скорость морского течения стационарна, но неоднородна в заданной акватории.

Гибкую связь (ГС) можно представить в виде совокупности отдельных малых элементов длиной l, соединённых между собой упругими связями (рис. 3.14) [85, 86]. На малый элемент ГС длиной ds действуют силы растяжения **T** и **T+dT**, которые создаются в результате сил, приложенных к коренному $\mathbf{F}_{\text{сн}}$ и ходовому $\mathbf{F}_{\text{па}}$ концам ГС со стороны СН и ПА, а также сил тяжести **q** ГС и гидродинамических сил $\mathbf{F}_n$ и $\mathbf{F}_\tau$, действующих по нормали и по касательной к поверхности ГС (рис. 3.14) [391, с. 21].

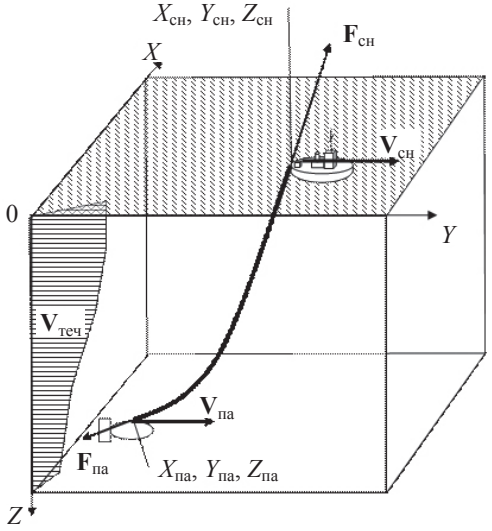


Рис. 3.13. Общая схема морской привязной системы (МПС)

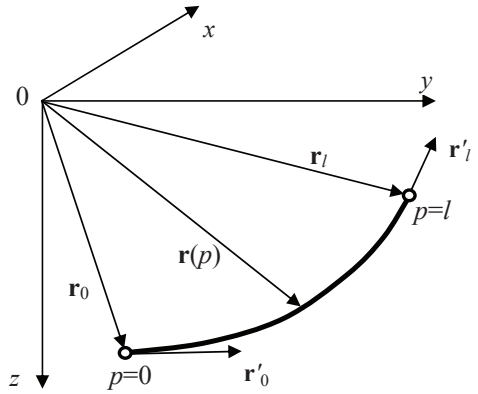


Рис. 3.14. Осевая линия элемента ГС

На элемент ГС также может действовать сосредоточенная внешняя сила **G**, возникающая в результате контактного взаимодействия ГС с подводными объектами. С прикладной точки зрения невозможно осуществить точечный контакт ГС с подводным объектом. Такой контакт будет происходить на некоторой малой длине ГС, но не в точке. Поэтому будем считать, что сила *G* действует на длину *ds* малого элемента ГС, т.е. она является распределённой на малой длине ГС. В процессе движения СН и ПА расстояние между ними изменяется, что вызывает изменение сил, действующих на ГС и её форму. Силы тяжести **q** ГС характеризуются линейной плотностью самой ГС, а также наличием на ней дополнительных распределённых грузов и поплавков.

Радиус-вектор ГС $\mathbf{r}(p)$ связан с вектором координат **e** зависимостью [391, с. 22]:

$$\vec{r}(p) = \mathbf{S}(p) \cdot \vec{e}, \tag{3.57}$$

где $\vec{e}$ — вектор обобщённых координат:

$$\vec{e} = \{\vec{r}_0^{\,0T}\ \vec{r}_0^{\,1T}\ \vec{r}_l^{\,0T}\ \vec{r}_l^{\,0T}\ \beta_0\ \beta_l\}^T; \tag{3.58}$$

$\vec{r}_u^{\,k} = \partial\vec{r}^{\,k} / \partial p^k\big|_{p=u} = \begin{Bmatrix} x_u^k \\ y_u^k \\ z_u^k \end{Bmatrix}$ — радиус-векторы ($k=0$) и касательные векторы ($k=1$) к осевой линии ГС в её концевых точках ($p=0$ и $p=l$), когда u принимает значения 0 ($p=0$) или l ($p=l$);

$\mathbf{S}(p) = \|s_1\mathbf{I}\ s_2\mathbf{I}\ s_3\mathbf{I}\ s_4\mathbf{I}\ 0\ 0\|$ — матрица функций форм ГС;

I — единичная матрица (3×3);

β_k — углы поворота поперечных сечений ГС в концевых точках элемента относительно нормали ***n*** репера Френе осевой линии (рис. 3.15) [58, 152];

l — длина осевой линии элемента ГС.

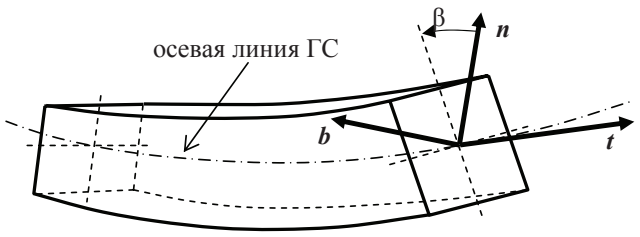


Рис. 3.15. Поворот концевого поперечного сечения элемента ГС относительно нормали репера Френе осевой линии, состоящего из вектора касательной *t*, нормали *n* и бинормали *b*

Угол β определяется вдоль осевой линии ГС ($p \in [0; l]$) с помощью интерполяционной зависимости

$$\beta(p) = \beta_0 \cdot (1 - p/l) + \beta_l \cdot p/l. \tag{3.59}$$

В качестве функций формы ГС использованы функции Эрмита [37]:

$$s_1(p) = s_3(l - p) = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3, \tag{3.60}$$

$$s_2(p) = -s_4(l - p) = l \cdot (\xi - 2\xi^2 + \xi^3), \tag{3.61}$$

$$s_3(p) = 3\xi^2 - 2\xi^3, \tag{3.62}$$

$$s_4(p) = l \cdot (\xi^3 - \xi^2), \tag{3.63}$$

$$\xi = p/l, \tag{3.64}$$

позволяющие аппроксимировать форму элемента ГС по величине и производной радиуса-вектора ГС:

$$x(p) = s_1(p) \cdot x_0 + s_2(p) \cdot x_0' + s_3(p) \cdot x_l + s_4(p) \cdot x_l', \tag{3.65}$$

$$y(p) = s_1(p) \cdot y_0 + s_2(p) \cdot y_0' + s_3(p) \cdot y_l + s_4(p) \cdot y_l', \tag{3.66}$$

$$x(p) = s_1(p) \cdot z_0 + s_2(p) \cdot z_0' + s_3(p) \cdot z_l + s_4(p) \cdot z_l'. \tag{3.67}$$

Уравнения движения элемента ГС могут быть получены с помощью уравнений Лагранжа II рода [373]:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{e}}} - \frac{\partial T}{\partial \mathbf{e}} + \frac{\partial U}{\partial \mathbf{e}} = \frac{\delta W}{\delta \mathbf{e}}, \tag{3.68}$$

где T — кинетическая энергия элемента ГС, Дж;

$$T = \frac{1}{2}\int_0^l \rho_l \cdot \dot{\vec{r}}^T \cdot \dot{\vec{r}} \cdot dp + \frac{1}{2}\int_0^l J_\beta \cdot \dot{\beta}^2 \cdot dp, \tag{3.69}$$

ρ_l — линейная плотность материала ГС, кг/м;

U — потенциальная энергия деформации элемента ГС, Дж;

δW — виртуальная работа активных сил, Дж;

$$\delta W = \int_0^l \delta\vec{r}^T \cdot \rho_l \cdot \vec{g} \cdot dp + \int_0^l \delta\vec{r}^T \cdot \vec{F} \cdot dp; \tag{3.70}$$

$\boldsymbol{g}$ — вектор ускорения силы тяжести, м/с^2;

$\boldsymbol{F}$ — вектор активных (внешних) сил, действующих на ГС, Н.

Использование вектора обобщённых координат в абсолютной системе координат [326, 373] не требует пересчёта координат узлов ГС между ней и вспомогательными системами координат, а также при этом отсутствует необходимость учёта присоединённых масс жидкости к ГС, если при определении гидродинамических сил сопротивления ГС использовать коэффициенты сопротивления, определённые эмпирическим путём. Т.о. использование метода абсолютных координат [326, 373, 377, 380] имеет существенные преимущества по сравнению с использованными ранее методами [81, 136].

После подстановки производных по времени радиуса-вектора $\dot{\vec{r}} = S \cdot \dot{\vec{e}}$ (3.57) и его вариации $\delta\vec{r} = S \cdot \delta\vec{e}$ в уравнение (3.68) уравнения движения в матричной форме принимают вид

$$M \cdot \ddot{\vec{e}} + \vec{Q}^e = \vec{Q}^g + \vec{Q}^F, \tag{3.71}$$

куда входят постоянные матрица масс (***M***) и столбец обобщённых сил тяжести (***Q***^{g}), а также вектор внешних активных сил (***Q***^{F}) и реакций упругого деформирования ГС (***Q***^{e}). Матрица масс определяется по формуле

$$M = \frac{\partial^2 T}{\partial \dot{\vec{e}} \partial \dot{\vec{e}}^T} = \rho_l \int_0^l S^T S \cdot dp = \text{const}; \tag{3.72}$$

$$\mathbf{M}_{ij} = \frac{\partial^2 T}{\partial \dot{\vec{e}}_i \partial \dot{\vec{e}}_j^{\,T}} = \rho_l \int_0^l s_i^T s_j \cdot dp \cdot \mathbf{I} = M_{ij} \cdot \mathbf{I},\ i, j \in [1;4]; \tag{3.72}$$

а столбец обобщённых сил тяжести

$$\vec{Q}^g = \frac{\partial W^g}{\partial \vec{e}} = \int_0^l \rho_l \cdot S^T \cdot \vec{g} \cdot dp = \text{const}; \tag{3.73}$$

$$\vec{Q}_i^g = \frac{\partial W^g}{\partial \vec{e}_i} = \int_0^l \rho_l \cdot s_i^T \cdot \vec{g} \cdot dp. \tag{3.73}$$

Столбец обобщённых активных сил

$$\vec{Q}^F = \frac{\partial W^F}{\partial \vec{e}} = \int_0^l S^T \cdot \vec{F} \cdot dp. \tag{3.74}$$

Элементы вектора обобщённых упругих сил

$$\vec{Q}^e = \frac{\partial U}{\partial \vec{e}}. \tag{3.75}$$

Потенциальная энергия внутренних сил упругих деформаций элемента ГС определяется по формуле

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l (E \cdot A \cdot \varepsilon^2 + E \cdot J_1 \cdot \chi_1^2 + E \cdot J_2 \cdot \chi_2^2 + G \cdot J_\beta \cdot \tau^2) \cdot dp, \tag{3.76}$$

где E — модуль Юнга материала ГС, Па;

G — модуль сдвига материала ГС, Па;

A — площадь поперечного сечения ГС, м^2;

J_1, J_2 — моменты инерции поперечного сечения ГС относительно его главных осей, м^4;

J_β — полярный момент инерции поперечного сечения ГС, м^4;

ε — продольная деформация осевой линии ГС с продольной жёсткостью E·A:

$$\varepsilon = \sqrt{\vec{r}'^T\vec{r}'} - 1 \approx \frac{1}{2}(r'^T r' - 1) = \frac{1}{2}[(\frac{\partial x}{\partial p})^2 + (\frac{\partial y}{\partial p})^2 + (\frac{\partial z}{\partial p})^2 - 1]. \quad (3.77)$$

Простейшая модель продольных сил получена в работе [77] с использованием следующего способа осреднения продольной деформации:

$$\bar{\varepsilon} \approx \frac{|r_0 - r_l|}{l} - 1 = \frac{\sqrt{(\vec{e}_1 - \vec{e}_3)^T(\vec{e}_1 - \vec{e}_3)}}{l} - 1, \quad (3.78)$$

где

$$(\vec{e}_1 - \vec{e}_3)^T(\vec{e}_1 - \vec{e}_3) = (x_0 - x_l)^2 + (y_0 - y_l)^2 + (z_0 - z_l)^2. \quad (3.79)$$

В этом случае продольные силы можно определить по формуле

$$Q_i^\varepsilon = \frac{\partial \Pi^\varepsilon}{\partial e_i} = EA\int_0^l \varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial e_i} dp,$$

$$Q_i^\varepsilon = \sum_{k=1}^{4} E \cdot A \cdot \bar{\varepsilon} \cdot \bar{S}_{ik}^{11} \cdot e_k = \sum_{k=1}^{4} K_{ik}^\varepsilon \cdot e_k, \quad (3.80)$$

где K_{ik}^ε — матрица продольной жёсткости ГС;

$$\bar{S}_{ik}^{11} = \int_0^l s_i' \cdot s_k' \cdot dp. \quad (3.81)$$

Силы реакции изгиба ГС можно определить по формуле

$$Q_i^\chi = \frac{\partial \Pi^\chi}{\partial e_i} = EJ\int_0^l \chi \frac{\partial \chi}{\partial e_i} dp.$$

Кривизны χ_1 и χ_2 осевой линии по отношению к главным осям инерции площади поперечного сечения с изгибными жёсткостями EJ_1, EJ_2 и кривизной осевой линии [77]:

$$\chi_0 = \frac{|\vec{r}' \times \vec{r}''|}{|\vec{r}'|^3}, \quad (3.82)$$

$$\chi_1 = \chi_0 \cdot \cos\beta, \quad (3.83)$$

$$\chi_2 = \chi_0 \cdot \sin\beta. \quad (3.84)$$

В развёрнутой записи (3.82)

$$\chi_0 = \frac{\sqrt{(y' \cdot z'' - z' \cdot y'')^2 + (z' \cdot x'' - x' \cdot z'')^2 + (x' \cdot y'' - y' \cdot x'')^2}}{(x'^2 + y'^2 + z'^2)^{3/2}}. \quad (3.85)$$

Силы реакции кручения ГС можно определить по формуле

$$Q_i^{\tau} = \frac{\partial \Pi^{\tau}}{\partial e_i} = GJ_{\tau} \int_0^l \tau \frac{\partial \tau}{\partial e_i} dp.$$

Относительный угол закручивания поперечного сечения ГС [77]

$$\tau = \chi_{\tau} + \partial\beta/\partial p, \tag{3.86}$$

где χ_{τ} — кручение (вторая кривизна) осевой линии с жёсткостью на кручение GJ_{τ}:

$$\chi_{\tau} = \frac{(r', r'', r''')}{\left|r' \times r''\right|^2}. \tag{3.87}$$

В развёрнутой записи

$$\chi_{\tau} = \frac{\begin{vmatrix} x' & y' & z' \\ x'' & y'' & z'' \\ x''' & y''' & z''' \end{vmatrix}}{(y' \cdot z'' - z' \cdot y'')^2 + (z' \cdot x'' - x' \cdot z'')^2 + (x' \cdot y'' - y' \cdot x'')^2}. \tag{3.88}$$

Элементы матрицы масс можно определить по формуле (3.72), выполнив замену переменной интегрирования:

$$M_{ij} = \rho_l \int_0^l s_i^T s_j \cdot dp = \rho_l \cdot l \int_0^l s_i^T s_j \cdot d\frac{p}{l} = \rho_l \cdot l \int_0^l s_i^T s_j \cdot d\xi,\ i, j \in [1;4]. \tag{3.89}$$

Вычислим элементы матрицы

$$M_{11} = \rho_l \cdot l \int_0^l (1 - 3\xi^2 + 2\xi^3)(1 - 3\xi^2 + 2\xi^3) \cdot d\xi, \tag{3.90}$$

$$M_{11} = \rho_l \cdot l \cdot (-2 + \frac{9}{5} + \frac{4}{7}) = \rho_l \cdot l \cdot \frac{63 + 20 - 70}{35} = \rho_l \cdot l \cdot \frac{13}{35} = \rho_l \cdot l \cdot \frac{156}{420}, \tag{3.90}$$

$$M_{21} = \rho_l \cdot l \int_0^l l \cdot (\xi - 2\xi^2 + \xi^3)(1 - 3\xi^2 + 2\xi^3) \cdot d\xi, \tag{3.91}$$

$$\begin{aligned}(\xi - 2\xi^2 + \xi^3)(1 - 3\xi^2 + 2\xi^3) &= (\xi - 2\xi^2 + \xi^3) - 3(\xi - 2\xi^2 + \xi^3)\xi^2 + 2(\xi - 2\xi^2 + \xi^3)\xi^3 = \\ &= \xi - 2\xi^2 + \xi^3 - 3\xi^3 + 6\xi^4 - 3\xi^5 + 2\xi^4 - 4\xi^5 + 2\xi^6 = \xi - 2\xi^2 - 2\xi^3 + 8\xi^4 - 7\xi^5 + 2\xi^6,\end{aligned} \tag{3.92}$$

$$M_{21} = \rho_l \cdot l \int_0^l l \cdot (\xi - 2\xi^2 - 2\xi^3 + 8\xi^4 - 7\xi^5 + 2\xi^6) \cdot d\xi =$$

$$= \rho_l \cdot l^2 (\frac{\xi^2}{2} - \frac{2\xi^3}{3} - \frac{2\xi^4}{4} + \frac{8\xi^5}{5} - \frac{7\xi^6}{6} + \frac{2\xi^7}{7})\Big|_0^1 = \rho_l \cdot l^2 (\frac{1}{2} - \frac{2}{3} - \frac{1}{2} + \frac{8}{5} - \frac{7}{6} + \frac{2}{7}) =$$

$$= \rho_l \cdot l^2 (-\frac{2}{3} + \frac{8}{5} - \frac{7}{6} + \frac{2}{7}) = \rho_l \cdot l^2 (\frac{-2 \cdot 210 + 8 \cdot 126 - 7 \cdot 105 + 2 \cdot 90}{630}) =$$

$$= \rho_l \cdot l^2 (\frac{-420 + 1008 - 735 + 180}{630}) = \rho_l \cdot l^2 \frac{33}{630} = \rho_l \cdot l^2 \frac{22}{420}, \tag{3.93}$$

$$M_{22} = \rho_l \cdot l \int_0^l l^2 \cdot (\xi - 2\xi^2 + \xi^3)^2 \cdot d\xi, \tag{3.94}$$

$$(\xi - 2\xi^2 + \xi^3)^2 = (\xi - 2\xi^2 + \xi^3)(\xi - 2\xi^2 + \xi^3) =$$
$$= \xi^2 - 2\xi^3 + \xi^4 - 2\xi^3 + 4\xi^4 - 2\xi^5 + \xi^4 - 2\xi^5 + \xi^6 = \xi^2 - 4\xi^3 + 6\xi^4 - 4\xi^5 + \xi^6, \tag{3.95}$$

$$M_{22} = \rho_l \cdot l^3 \int_0^l (\xi^2 - 4\xi^3 + 6\xi^4 - 4\xi^5 + \xi^6) \cdot d\xi, \tag{3.96}$$

или

$$M_{22} = \rho_l \cdot l^3 \left(\frac{1}{3} - \frac{4}{4} + \frac{6}{5} - \frac{4}{6} + \frac{1}{7}\right) =$$
$$= \rho_l \cdot l^3 \frac{140 - 420 + 6 \cdot 84 - 4 \cdot 70 + 60}{420} = \rho_l \cdot l^3 \frac{4}{420}. \tag{3.96}$$

Аналогичным образом вычислены остальные элементы матрицы **M**, в результате она приобретает вид

$$\mathbf{M} = \frac{\rho_l \cdot l}{420} \cdot \begin{Vmatrix} 156\mathbf{I} & 22l\mathbf{I} & 54\mathbf{I} & -13l\mathbf{I} & 0 & 0 \\ 22l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 & 0 \\ 54\mathbf{I} & 13l\mathbf{I} & 156\mathbf{I} & -22l\mathbf{I} & 0 & 0 \\ -13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & -22l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{13\,13} & M_{13\,14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{14\,13} & M_{14\,14} \end{Vmatrix}. \tag{3.97}$$

Матрица (3.97) симметрична относительно главной диагонали. С учётом единичной матрицы она приобретает вид

$$\mathbf{M} = \frac{\rho_l \cdot l}{420} \begin{Vmatrix} 156 & 0 & 0 & 22l & 0 & 0 & 54 & 0 & 0 & -13l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 0 & 0 & 22l & 0 & 0 & 54 & 0 & 0 & -13l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 156 & 0 & 0 & 22l & 0 & 0 & 54 & 0 & 0 & -13l & 0 & 0 \\ 22l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 13l & 0 & 0 & -3l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 22l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 13l & 0 & 0 & -3l^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 22l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 13l & 0 & 0 & -3l^2 & 0 & 0 \\ 54 & 0 & 0 & 13l & 0 & 0 & 156 & 0 & 0 & -22l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 0 & 0 & 13l & 0 & 0 & 156 & 0 & 0 & -22l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 54 & 0 & 0 & 13l & 0 & 0 & 156 & 0 & 0 & -22l & 0 & 0 \\ -13l & 0 & 0 & -3l^2 & 0 & 0 & -22l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -13l & 0 & 0 & -3l^2 & 0 & 0 & -22l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -13l & 0 & 0 & -3l^2 & 0 & 0 & -22l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{13\,13} & M_{13\,14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{14\,13} & M_{14\,14} \end{Vmatrix}. \tag{3.98}$$

Элементы матрицы масс, связанные с кручением ГС, ($M_{13\,13}$, $M_{13\,14}$, $M_{14\,13}$, $M_{14\,14}$) определяются в результате преобразования второго слагаемого кинетической энергии элемента ГС (3.69):

$$T_\tau = \frac{1}{2} J_\beta \int_0^l \dot{\beta}^2 \cdot dp. \tag{3.99}$$

Из аппроксимации угла кручения (3.59) следует

$$\dot{\beta} = \dot{\beta}_0 \cdot (1 - p/l) + \dot{\beta}_l \cdot p/l, \tag{3.100}$$

тогда

$$T_\tau = \frac{1}{2} J_\beta \int_0^l [\dot{\beta}_0 \cdot (1 - p/l) + \dot{\beta}_l \cdot p/l]^2 \cdot dp. \tag{3.99}$$

Элементы матрицы масс кручения элемента ГС можно определить из первого слагаемого уравнения Лагранжа II рода (3.68):

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T_\tau}{\partial \dot{\beta}_0} = \frac{1}{2} J_\beta \int_0^l 2 \cdot [\ddot{\beta}_0 \cdot (1 - p/l) + \ddot{\beta}_l \cdot p/l] \cdot (1 - p/l) \cdot dp, \tag{3.99}$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T_\tau}{\partial \dot{\beta}_1} = \frac{1}{2} J_\beta \int_0^l 2 \cdot [\ddot{\beta}_0 \cdot (1 - p/l) + \ddot{\beta}_l \cdot p/l] \cdot p/l \cdot dp. \tag{3.101}$$

В результате интегрирования (3.100) и (3.101) получили

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T_\tau}{\partial \dot{\beta}_0} = \frac{1}{3} J_\beta \cdot l \cdot \ddot{\beta}_0 + \frac{1}{6} J_\beta \cdot l \cdot \ddot{\beta}_l = M_{13\,13} \cdot \ddot{\beta}_0 + M_{13\,14} \cdot \ddot{\beta}_l, \tag{3.102}$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T_\tau}{\partial \dot{\beta}_1} = J_\beta \cdot l \cdot \int_0^l \{\ddot{\beta}_0 \cdot [(p/l) - (p/l)^2] + \ddot{\beta}_l \cdot (p/l)^2\} \cdot d(p/l) =$$

$$= J_\beta \cdot l \cdot \{\ddot{\beta}_0 \cdot [\frac{(p/l)^2}{2} - \frac{(p/l)^3}{3}] + \ddot{\beta}_l \cdot \frac{(p/l)^3}{3}\}\Big|_0^1, \tag{3.103}$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T_\tau}{\partial \dot{\beta}_1} = \frac{1}{6} J_\beta \cdot l \cdot \ddot{\beta}_0 \cdot + \frac{1}{3} J_\beta \cdot l \cdot \ddot{\beta}_l = M_{14\,13} \cdot \ddot{\beta}_0 + M_{14\,14} \cdot \ddot{\beta}_l. \tag{3.103}$$

Добавим элементы матрицы масс, связанные с кручением ГС, ($M_{13\,13}$, $M_{13\,14}$, $M_{14\,13}$, $M_{14\,14}$) в матрицу масс (3.98):

$$\mathbf{M} = \frac{\rho_l \cdot l}{420} \begin{Vmatrix} 156 & 0 & 0 & 22l & 0 & 0 & 54 & 0 & 0 & -13l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 0 & 0 & 22l & 0 & 0 & 54 & 0 & 0 & -13l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 156 & 0 & 0 & 22l & 0 & 0 & 54 & 0 & 0 & -13l & 0 & 0 \\ 22l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 13l & 0 & 0 & -3l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 22l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 13l & 0 & 0 & -3l^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 22l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 13l & 0 & 0 & -3l^2 & 0 & 0 \\ 54 & 0 & 0 & 13l & 0 & 0 & 156 & 0 & 0 & -22l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 0 & 0 & 13l & 0 & 0 & 156 & 0 & 0 & -22l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 54 & 0 & 0 & 13l & 0 & 0 & 156 & 0 & 0 & -22l & 0 & 0 \\ -13l & 0 & 0 & -3l^2 & 0 & 0 & -22l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -13l & 0 & 0 & -3l^2 & 0 & 0 & -22l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -13l & 0 & 0 & -3l^2 & 0 & 0 & -22l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 140J_\beta/\rho_l & 70J_\beta/\rho_l \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l & 140J_\beta/\rho_l \end{Vmatrix}. \tag{3.104}$$

Для определения K_{ik}^{ε} — матрицы продольной жёсткости элементов ГС, необходимо вычислить составляющие её элементов (3.81). Предварительно нужно вычислить производные функций Эрмита (3.60)–(3.63):

$$s_1'(p) = (1 - 3\frac{p^2}{l^2} + 2\frac{p^3}{l^3})' = 6(\frac{p^2}{l^3} - \frac{p}{l^2}), \tag{3.105}$$

$$s_2'(p) = l \cdot (\frac{p}{l} - 2\frac{p^2}{l^2} + \frac{p^3}{l^3})' = l \cdot (\frac{1}{l} - 4\frac{p}{l^2} + 3\frac{p^2}{l^3}) = 1 - 4\frac{p}{l} + 3\frac{p^2}{l^2}, \tag{3.106}$$

$$s_3'(p) = (3\frac{p^2}{l^2} - 2\frac{p^3}{l^3})' = 6\frac{p}{l^2} - 6\frac{p^2}{l^3} = 6(\frac{p}{l^2} - \frac{p^2}{l^3}), \tag{3.107}$$

$$s_4'(p) = l \cdot (\frac{p^3}{l^3} - \frac{p^2}{l^2})' = l \cdot (3\frac{p^2}{l^3} - 2\frac{p}{l^2}) = 3\frac{p^2}{l^2} - 2\frac{p}{l}. \tag{3.108}$$

Затем вычислить интегралы

$$\overline{S}_{11}^{11} = \int_0^l s_1' \cdot s_1' \cdot dp = 36\int_0^l (\frac{p^2}{l^3} - \frac{p}{l^2})^2 dp. \tag{3.109}$$

$$\overline{S}_{11}^{11} = 36(\frac{p^5}{5l^6} - 2\frac{p^4}{4l^5} + \frac{p^3}{3l^4}) \Big|_0^l. \tag{3.109}$$

$$\overline{S}_{11}^{11} = 36(\frac{l^5}{5l^6} - 2\frac{l^4}{4l^5} + \frac{l^3}{3l^4}) = \frac{36}{l}(\frac{1}{5} - \frac{1}{2} + \frac{1}{3}) = \frac{36}{l}(\frac{6 - 15 + 10}{30}) = \frac{6}{5l}. \tag{3.109}$$

$$\overline{S}_{12}^{11} = \int_0^l s_1' \cdot s_2' \cdot dp = 6\int_0^l (\frac{p^2}{l^3} - \frac{p}{l^2})(1 - 4\frac{p}{l} + 3\frac{p^2}{l^2}) dp. \tag{3.110}$$

$$\overline{S}_{12}^{11} = \frac{5 \cdot 20 - 30 - 60 + 3 \cdot 12 - 3 \cdot 15}{10} = \frac{100 - 30 - 60 + 36 - 45}{10} = \frac{1}{10}. \tag{3.110}$$

$$\overline{S}_{13}^{11} = \int_0^l s_1' \cdot s_3' \cdot dp = 36\int_0^l (\frac{p^2}{l^3} - \frac{p}{l^2})(\frac{p}{l^2} - \frac{p^2}{l^3}) dp. \tag{3.111}$$

$$\overline{S}_{13}^{11} = \frac{36}{l}(\frac{2}{4} - \frac{1}{3} - \frac{1}{5}) = \frac{36}{l}\frac{2 \cdot 15 - 20 - 12}{60} = \frac{36}{l}\frac{-2}{60} = -\frac{6}{5l}. \tag{3.111}$$

$$\overline{S}_{14}^{11} = \int_0^l s_1' \cdot s_4' \cdot dp = 6\int_0^l (\frac{p^2}{l^3} - \frac{p}{l^2})(3\frac{p^2}{l^2} - 2\frac{p}{l}) dp. \tag{3.112}$$

$$\overline{S}_{14}^{11} = 6\frac{36 - 75 + 40}{60} = \frac{1}{10}. \tag{3.112}$$

$$\overline{S}_{22}^{11} = \int_0^l s_2' \cdot s_2' \cdot dp = \int_0^l (1 - 4\frac{p}{l} + 3\frac{p^2}{l^2})^2 dp. \tag{3.113}$$

$$\overline{S}_{22}^{11} = l(\frac{608 - 600}{60}) = l\frac{8}{60} = l\frac{2}{15}. \tag{3.113}$$

$$\overline{S}_{23}^{11} = \int_0^l s_2' \cdot s_3' \cdot dp = 6\int_0^l (1 - 4\frac{p}{l} + 3\frac{p^2}{l^2})(\frac{p}{l^2} - \frac{p^2}{l^3})dp. \tag{3.114}$$

$$\overline{S}_{23}^{11} = 6\frac{30 - 100 + 105 - 36}{60} = -\frac{1}{10}. \tag{3.114}$$

$$\overline{S}_{24}^{11} = \int_0^l s_2' \cdot s_4' \cdot dp = \int_0^l (1 - 4\frac{p}{l} + 3\frac{p^2}{l^2})(3\frac{p^2}{l^2} - 2\frac{p}{l})dp. \tag{3.115}$$

$$\overline{S}_{24}^{11} = l\frac{164 - 165}{30} = -l\frac{1}{30}. \tag{3.115}$$

$$\overline{S}_{33}^{11} = \int_0^l s_3' \cdot s_3' \cdot dp = 36\int_0^l (\frac{p}{l^2} - \frac{p^2}{l^3})^2 dp. \tag{3.116}$$

$$\overline{S}_{33}^{11} = \frac{36}{l}(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} + \frac{1}{5}) = \frac{36}{l}(\frac{10 - 15 + 6}{30}) = \frac{6}{5l}. \tag{3.116}$$

$$\overline{S}_{34}^{11} = \int_0^l s_3' \cdot s_4' \cdot dp = 6\int_0^l (\frac{p}{l^2} - \frac{p^2}{l^3})(3\frac{p^2}{l^2} - 2\frac{p}{l})dp. \tag{3.117}$$

$$\overline{S}_{34}^{11} = 6(\frac{45 - 36 - 40 + 30}{60}) = \frac{75 - 76}{10} = -\frac{1}{10}. \tag{3.117}$$

$$\overline{S}_{44}^{11} = \int_0^l s_4' \cdot s_4' \cdot dp = \int_0^l (3\frac{p^2}{l^2} - 2\frac{p}{l})^2 dp. \tag{3.118}$$

$$\overline{S}_{44}^{11} = l(\frac{9}{5} - 3 + \frac{4}{3}) = l(\frac{27 - 45 + 20}{15}) = l\frac{2}{15}. \tag{3.118}$$

Элементы матрицы $\overline{S}_{ik}^{11}$ симметричны относительно главной диагонали.

$$Q_i^{\varepsilon} = \sum_{k=1}^{4} E \cdot A \cdot \overline{\varepsilon} \cdot \overline{S}_{ik}^{11} \cdot e_k = \sum_{k=1}^{4} K_{ik}^{\varepsilon} \cdot e_k = K^{\varepsilon} \cdot \vec{e}, \tag{3.119}$$

$$K^{\varepsilon} = K_0^{\varepsilon} \cdot \overline{\varepsilon}, \tag{3.119}$$

$$K_0^{\varepsilon} = E \cdot A \begin{Vmatrix} 6/5l & 0 & 0 & 1/10 & 0 & 0 & -6/5l & 0 & 0 & 1/10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6/5l & 0 & 0 & 1/10 & 0 & 0 & -6/5l & 0 & 0 & 1/10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6/5l & 0 & 0 & 1/10 & 0 & 0 & -6/5l & 0 & 0 & 1/10 & 0 & 0 \\ 1/10 & 0 & 0 & 2l/15 & 0 & 0 & -1/10 & 0 & 0 & -l/30 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/10 & 0 & 0 & 2l/15 & 0 & 0 & -1/10 & 0 & 0 & -l/30 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/10 & 0 & 0 & 2l/15 & 0 & 0 & -1/10 & 0 & 0 & -l/30 & 0 & 0 \\ -6/5l & 0 & 0 & -1/10 & 0 & 0 & 6/5l & 0 & 0 & -1/10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -6/5l & 0 & 0 & -1/10 & 0 & 0 & 6/5l & 0 & 0 & -1/10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6/5l & 0 & 0 & -1/10 & 0 & 0 & 6/5l & 0 & 0 & -1/10 & 0 & 0 \\ 1/10 & 0 & 0 & -l/30 & 0 & 0 & -1/10 & 0 & 0 & 2l/15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/10 & 0 & 0 & -l/30 & 0 & 0 & -1/10 & 0 & 0 & 2l/15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/10 & 0 & 0 & -l/30 & 0 & 0 & -1/10 & 0 & 0 & 2l/15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}. \tag{3.120}$$

$$K_0^{\varepsilon} = \frac{EA}{30l}\begin{Vmatrix} 36 & 0 & 0 & 3l & 0 & 0 & -36 & 0 & 0 & 3l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 36 & 0 & 0 & 3l & 0 & 0 & -36 & 0 & 0 & 3l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 36 & 0 & 0 & 3l & 0 & 0 & -36 & 0 & 0 & 3l & 0 & 0 \\ 3l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & -3l & 0 & 0 & -l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & -3l & 0 & 0 & -l^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & -3l & 0 & 0 & -l^2 & 0 & 0 \\ -36 & 0 & 0 & -3l & 0 & 0 & 36 & 0 & 0 & -3l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -36 & 0 & 0 & -3l & 0 & 0 & 36 & 0 & 0 & -3l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -36 & 0 & 0 & -3l & 0 & 0 & 36 & 0 & 0 & -3l & 0 & 0 \\ 3l & 0 & 0 & -l^2 & 0 & 0 & -3l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3l & 0 & 0 & -l^2 & 0 & 0 & -3l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3l & 0 & 0 & -l^2 & 0 & 0 & -3l & 0 & 0 & 4l^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}. \quad (3.120)$$

Вычислим компоненты столбца обобщённых сил тяжести по формулам (3.79):

$$\vec{Q}_i^g = \rho_l \cdot \vec{g} \cdot \int_0^l s_i^T \cdot dp. \quad (3.121)$$

где $i \in [1;4]$ — номера блоков матриц-столбцов в матрице-столбце обобщённых сил тяжести.

Подставив функции Эрмита (3.60)–(3.63) в формулу (3.121), получим:

$$\vec{Q}_1^g = \rho_l \cdot \vec{g} \cdot \int_0^l s_1 \cdot dp, \quad (3.122)$$

или

$$\vec{Q}_1^g = \rho_l \cdot \vec{g} \cdot l \cdot (1 - 1 + \frac{1}{2}) = \rho_l \cdot \vec{g} \cdot l \cdot \frac{1}{2}, \quad (3.122)$$

$$\vec{Q}_2^g = \rho_l \cdot \vec{g} \cdot \int_0^l s_2 \cdot dp, \quad (3.122)$$

или

$$\vec{Q}_2^g = \rho_l \cdot \vec{g} \cdot l^2 \cdot (\frac{1}{2} - \frac{2}{3} + \frac{1}{4}) = \rho_l \cdot \vec{g} \cdot l^2 \cdot \frac{6 - 8 + 3}{12} = \rho_l \cdot \vec{g} \cdot l^2 \cdot \frac{1}{12}, \quad (3.123)$$

$$\vec{Q}_3^g = \rho_l \cdot \vec{g} \cdot \int_0^l s_3 \cdot dp, \quad (3.124)$$

или

$$\vec{Q}_3^g = \rho_l \cdot \vec{g} \cdot l \cdot (1 - \frac{1}{2}) = \rho_l \cdot \vec{g} \cdot l \cdot \frac{1}{2}, \quad (3.124)$$

$$\vec{Q}_4^g = \rho_l \cdot \vec{g} \cdot \int_0^l s_4 \cdot dp, \quad (3.125)$$

или

$$\vec{Q}_4^g = \rho_l \cdot \vec{g} \cdot l^2 \cdot (\frac{1}{4} - \frac{1}{3}) = \rho_l \cdot \vec{g} \cdot l^2 \cdot \frac{3 - 4}{12} = -\rho_l \cdot \vec{g} \cdot l^2 \cdot \frac{1}{12}. \quad (3.125)$$

В конечном итоге матрица обобщённых сил тяжести имеет вид

$$Q^g = \begin{Vmatrix} \rho_l \cdot g_x \cdot l \cdot \frac{1}{2} \\ \rho_l \cdot g_y \cdot l \cdot \frac{1}{2} \\ \rho_l \cdot g_z \cdot l \cdot \frac{1}{2} \\ \rho_l \cdot g_x \cdot l^2 \cdot \frac{1}{12} \\ \rho_l \cdot g_y \cdot l^2 \cdot \frac{1}{12} \\ \rho_l \cdot g_z \cdot l^2 \cdot \frac{1}{12} \\ \rho_l \cdot g_x \cdot l \cdot \frac{1}{2} \\ \rho_l \cdot g_y \cdot l \cdot \frac{1}{2} \\ \rho_l \cdot g_z \cdot l \cdot \frac{1}{2} \\ -\rho_l \cdot g_x \cdot l^2 \cdot \frac{1}{12} \\ -\rho_l \cdot g_y \cdot l^2 \cdot \frac{1}{12} \\ -\rho_l \cdot g_z \cdot l^2 \cdot \frac{1}{12} \\ 0 \\ 0 \end{Vmatrix}. \tag{3.126}$$

Если вектор ускорения силы тяжести совпадает по направлению с осью z, тогда

$$Q^g = \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho_l \cdot g_z \cdot l \cdot \frac{1}{2} \\ 0 \\ 0 \\ \rho_l \cdot g_z \cdot l^2 \cdot \frac{1}{12} \\ 0 \\ 0 \\ \rho_l \cdot g_z \cdot l \cdot \frac{1}{2} \\ 0 \\ 0 \\ -\rho_l \cdot g_z \cdot l^2 \cdot \frac{1}{12} \\ 0 \\ 0 \end{Vmatrix} \tag{3.127}$$

или

$$Q^g = \rho_l \cdot g_z \cdot l \cdot \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{2} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{l}{12} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{2} \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{l}{12} \\ 0 \\ 0 \end{Vmatrix}. \tag{3.127}$$

Уравнение (3.71) записано для одного элемента ГС (рис. 3.13) и не учитывает связь с другими её элементами. Узлы элемента ГС соединены с узлами соседних элементов. Поэтому уравнение (3.71) необходимо преобразовать с учётом влияния на элемент ГС соседних с ним элементов.

Разделим ГС на N элементов и введём сквозную нумерацию её узлов $i \in [1; N]$. Рассмотрим взаимодействие двух соседних элементов, имеющих общий узел с номером i (рис. 3.16) [392, с. 9].

Условно разделим узел i на два узла i_1 и i_2, а отсутствующую между ними связь заменим обобщёнными реакциями $\boldsymbol{R}$ и $-\boldsymbol{R}$. Учитывая, что узлы i_1 и i_2 составляют один узел i, то их обобщённые координаты равны координатам узла i. Это значит, что уравнения динамики этих узлов отличаются друг от друга только знаками реакций связи $\boldsymbol{R}$, обобщёнными силами и матрицами масс. Преобразуем вектор обобщённых координат элемента ГС (3.58) для элемента с узлами i–1 и i_1, изменив в нём порядок расположения координат:

$$\vec{e}_{i-1} = \{\vec{r}^{\,0T}_{i-1}\ \vec{r}^{\,1T}_{i-1}\ \beta_{i-1}\ \vec{r}^{\,0T}_{i_1}\ \vec{r}^{\,1T}_{i_1}\ \beta_{i_1}\}^T, \tag{3.128}$$

а вектор обобщённых координат элемента ГС с узлами i_2 и $i + 1$:

$$\vec{e}_{i+1} = \{\vec{r}^{\,0T}_{i_2}\ \vec{r}^{\,1T}_{i_2}\ \beta_{i_2}\ \vec{r}^{\,0T}_{i+1}\ \vec{r}^{\,1T}_{i+1}\ \beta_{i+1}\}^T. \tag{3.129}$$

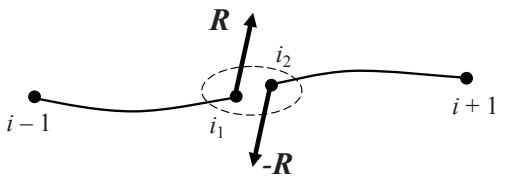


Рис. 3.16. Схема соединения соседних элементов ГС

Тогда блочная матрица масс элемента ГС (3.97) с узлами i–1 и i_1, а также элемента с узлами i_2 и i+1 имеет вид

$$\mathbf{M} = \frac{\rho_l \cdot l}{420} \cdot \begin{Vmatrix} 156\mathbf{I} & 22l\mathbf{I} & 0 & 54\mathbf{I} & -13l\mathbf{I} & 0 \\ 22l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 & 13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 140J_\beta/\rho_l & 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l \\ 54\mathbf{I} & 13l\mathbf{I} & 0 & 156\mathbf{I} & -22l\mathbf{I} & 0 \\ -13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 & -22l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l & 0 & 0 & 140J_\beta/\rho_l \end{Vmatrix}. \quad (3.130)$$

В этой матрице для элемента ГС (3.97) с узлами i–1 и i_1 можно выделить четыре блока:

$$\mathbf{M}_{i-1} = \frac{\rho_l \cdot l}{420} \cdot \begin{Vmatrix} \mathbf{M}_{1\,i-1} & \mathbf{M}_{1\,i_1} \\ \mathbf{M}_{2\,i-1} & \mathbf{M}_{2\,i_1} \end{Vmatrix}, \quad (3.131)$$

где

$$\mathbf{M}_{1\,i-1} = \begin{Vmatrix} 156\mathbf{I} & 22l\mathbf{I} & 0 \\ 22l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 140J_\beta/\rho_l \end{Vmatrix}; \quad (3.132)$$

$$\mathbf{M}_{2\,i-1} = \begin{Vmatrix} 54\mathbf{I} & 13l\mathbf{I} & 0 \\ -13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l \end{Vmatrix}; \quad (3.133)$$

$$\mathbf{M}_{1\,i_1} = \begin{Vmatrix} 54\mathbf{I} & -13l\mathbf{I} & 0 \\ 13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l \end{Vmatrix}; \quad (3.134)$$

$$\mathbf{M}_{2\,i-1} = \begin{Vmatrix} 156\mathbf{I} & -22l\mathbf{I} & 0 \\ -22l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 140J_\beta/\rho_l \end{Vmatrix}. \quad (3.135)$$

В матрице для элемента ГС (3.97) с узлами i_2 и i+1 также можно выделить четыре блока

$$\mathbf{M}_{i+1} = \frac{\rho_l \cdot l}{420} \cdot \begin{Vmatrix} \mathbf{M}_{1\,i_2} & \mathbf{M}_{1\,i+1} \\ \mathbf{M}_{2\,i_2} & \mathbf{M}_{2\,i+1} \end{Vmatrix}, \quad (3.136)$$

где

$$\mathbf{M}_{1\,i_2} = \begin{Vmatrix} 156\mathbf{I} & 22l\mathbf{I} & 0 \\ 22l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 140J_\beta/\rho_l \end{Vmatrix}; \quad (3.137)$$

$$\mathbf{M}_{2i_2} = \begin{Vmatrix} 54\mathbf{I} & 13l\mathbf{I} & 0 \\ -13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 70J_\beta / \rho_l \end{Vmatrix}; \tag{3.138}$$

$$\mathbf{M}_{1i+1} = \begin{Vmatrix} 54\mathbf{I} & -13l\mathbf{I} & 0 \\ 13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 70J_\beta / \rho_l \end{Vmatrix}; \tag{3.139}$$

$$\mathbf{M}_{2i+1} = \begin{Vmatrix} 156\mathbf{I} & -22l\mathbf{I} & 0 \\ -22l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 140J_\beta / \rho_l \end{Vmatrix}. \tag{3.140}$$

Матрица жёсткостей (3.104) преобразована к блочному виду:

$$\mathbf{K}_0^\varepsilon = \frac{EA}{30l} \begin{Vmatrix} 36\mathbf{I} & 3l\mathbf{I} & 0 & -36\mathbf{I} & 3l\mathbf{I} & 0 \\ 3l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 & -3l\mathbf{I} & -l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -36\mathbf{I} & -3l\mathbf{I} & 0 & 36\mathbf{I} & -3l\mathbf{I} & 0 \\ 3l\mathbf{I} & -l^2\mathbf{I} & 0 & -3l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}. \tag{3.141}$$

По аналогии с матрицей масс, в этой матрице для элемента ГС (3.141) с узлами i–1 и i_1 можно выделить четыре блока:

$$\mathbf{K}_{0i-1}^\varepsilon = \frac{E \cdot A}{30 \cdot l} \cdot \begin{Vmatrix} \mathbf{K}_{1\,i-1} & \mathbf{K}_{1\,i_1} \\ \mathbf{K}_{2\,i-1} & \mathbf{K}_{2\,i_1} \end{Vmatrix}, \tag{3.142}$$

где

$$\mathbf{K}_{1\,i-1} = \begin{Vmatrix} 36\mathbf{I} & 3l\mathbf{I} & 0 \\ 3l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}; \tag{3.143}$$

$$\mathbf{K}_{2\,i-1} = \begin{Vmatrix} -36\mathbf{I} & -3l\mathbf{I} & 0 \\ 3l\mathbf{I} & -l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}; \tag{3.144}$$

$$\mathbf{K}_{1\,i_1} = \begin{Vmatrix} -36\mathbf{I} & 3l\mathbf{I} & 0 \\ -3l\mathbf{I} & -l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}; \tag{3.145}$$

$$\mathbf{K}_{2\,i_1} = \begin{Vmatrix} 36\mathbf{I} & -3l\mathbf{I} & 0 \\ -3l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}. \tag{3.146}$$

В матрице жёсткости элемента ГС (3.97) с узлами i_2 и i+1 также можно выделить четыре блока

$$\mathbf{К}^{\varepsilon}_{0i+1} = \frac{E \cdot A}{30 \cdot l} \cdot \begin{Vmatrix} \mathbf{К}_{1\,i_2} & \mathbf{К}_{1\,i+1} \\ \mathbf{К}_{2\,i_2} & \mathbf{К}_{2\,i+1} \end{Vmatrix}, \tag{3.142}$$

где

$$\mathbf{К}_{1\,i_2} = \begin{Vmatrix} 36\mathbf{I} & 3l\mathbf{I} & 0 \\ 3l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}; \tag{3.143}$$

$$\mathbf{К}_{2\,i_2} = \begin{Vmatrix} -36\mathbf{I} & -3l\mathbf{I} & 0 \\ 3l\mathbf{I} & -l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}; \tag{3.144}$$

$$\mathbf{К}_{1\,i+1} = \begin{Vmatrix} -36\mathbf{I} & 3l\mathbf{I} & 0 \\ -3l\mathbf{I} & -l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}; \tag{3.145}$$

$$\mathbf{К}_{2\,i+1} = \begin{Vmatrix} 36\mathbf{I} & -3l\mathbf{I} & 0 \\ -3l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}. \tag{3.146}$$

Вектор обобщённых координат элемента ГС с узлами i–1 и i_1 (3.128) преобразуем к блочному виду:

$$\vec{e}_{i-1} = \{\vec{e}^{\,0}_{i-1}\ \vec{e}_{i_1}\}^T, \tag{3.147}$$

где

$$\vec{e}^{\,0}_{i-1} = \{\vec{r}^{\,0T}_{i-1}\ \vec{r}^{\,1T}_{i-1}\ \beta_{i-1}\}^T; \tag{3.148}$$

$$\vec{e}_{i_1} = \{\vec{r}^{\,0T}_{i_1}\ \vec{r}^{\,1T}_{i_1}\ \beta_{i_1}\}^T, \tag{3.149}$$

а вектор обобщённых координат элемента ГС с узлами i_2 и i+1 (3.129):

$$\vec{e}_{i+1} = \{\vec{e}_{i_2}\ \vec{e}^{\,0}_{i+1}\}^T, \tag{3.150}$$

где

$$\vec{e}_{i_2} = \{\vec{r}^{\,0T}_{i_2}\ \vec{r}^{\,1T}_{i_2}\ \beta_{i_2}\}^T; \tag{3.151}$$

$$\vec{e}^{\,0}_{i+1} = \{\vec{r}^{\,0T}_{i+1}\ \vec{r}^{\,1T}_{i+1}\ \beta_{i+1}\}^T. \tag{3.152}$$

С учётом введённых матриц уравнение (3.71) для элемента ГС с узлами i–1 и i_1 преобразуем к системе уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\rho_l \cdot l}{420} \cdot \mathbf{М}_{1\,i-1} \cdot \ddot{\vec{e}}^{\,0}_{i-1} + \frac{\rho_l \cdot l}{420} \cdot \mathbf{М}_{1\,i_1} \cdot \ddot{\vec{e}}_{i_1} + \frac{E \cdot A}{30 \cdot l} \cdot \mathbf{К}_{1\,i-1} \cdot \bar{\varepsilon}_{i-1} \cdot \vec{e}^{\,0}_{i-1} + \frac{E \cdot A}{30 \cdot l} \cdot \mathbf{К}_{1\,i_1} \cdot \bar{\varepsilon}_{i-1} \cdot \vec{e}_{i_1} = \vec{Q}^{g}_{i-1} + \vec{Q}^{F}_{i-1} \\ \frac{\rho_l \cdot l}{420} \cdot \mathbf{М}_{2\,i-1} \cdot \ddot{\vec{e}}^{\,0}_{i-1} + \frac{\rho_l \cdot l}{420} \cdot \mathbf{М}_{2\,i_1} \cdot \ddot{\vec{e}}_{i_1} + \frac{E \cdot A}{30 \cdot l} \cdot \mathbf{К}_{2\,i-1} \cdot \bar{\varepsilon}_{i-1} \cdot \vec{e}^{\,0}_{i-1} + \frac{E \cdot A}{30 \cdot l} \cdot \mathbf{К}_{2\,i_1} \cdot \bar{\varepsilon}_{i-1} \cdot \vec{e}_{i_1} = \vec{Q}^{g}_{i_1} + \vec{Q}^{F}_{i_1} + \vec{R} \end{cases}, \tag{3.153}$$

а с учётом введённых матриц уравнение (3.71) для элемента ГС с узлами i_2 и i+1 преобразуем к системе уравнений

$$\begin{cases} \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{1\,i_2}\cdot \ddot{\vec{e}}_{i_2} + \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{1\,i+1}\cdot \ddot{\vec{e}}^{\,0}_{i+1} + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{1\,i_2}\cdot \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot \vec{e}_{i_2} + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{1\,i+1}\cdot \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot \vec{e}^{\,0}_{i+1} = \vec{Q}^{\,g}_{i_2} + \vec{Q}^{\,F}_{i_2} - \vec{R} \\ \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{2\,i_2}\cdot \ddot{\vec{e}}_{i_2} + \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{2\,i+1}\cdot \ddot{\vec{e}}^{\,0}_{i+1} + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{2i_2}\cdot \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot \vec{e}_{i_2} + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{2\,i+1}\cdot \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot \vec{e}^{\,0}_{i+1} = \vec{Q}^{\,g}_{i+1} + \vec{Q}^{\,F}_{i+1} \end{cases}. \quad (3.154)$$

В узле $i = i_1 \equiv i_2$ выполняется равенство

$$\vec{e}_i = \vec{e}_{i_2} \equiv \vec{e}_{i_1}, \quad (3.155)$$

тогда обобщённые переменные в узле i можно заменить на $\vec{e}_i$ и исключить реакции связей в узле i из второго уравнения в (3.153) и первого — в (3.154):

$$\begin{aligned} &\frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{2\,i-1}\cdot \ddot{\vec{e}}^{\,0}_{i-1} + \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{2\,i_1}\cdot \ddot{\vec{e}}_i + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{2\,i-1}\cdot \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot \vec{e}^{\,0}_{i-1} + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{2\,i_1}\cdot \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot \vec{e}_i + \\ &\frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{1\,i_2}\cdot \ddot{\vec{e}}_i + \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{1\,i+1}\cdot \ddot{\vec{e}}^{\,0}_{i+1} + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{1\,i_2}\cdot \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot \vec{e}_i + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{1\,i+1}\cdot \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot \vec{e}^{\,0}_{i+1} = \\ &= \vec{Q}^{\,g}_{i_1} + \vec{Q}^{\,F}_{i_1} + \vec{R} + \vec{Q}^{\,g}_{i_2} + \vec{Q}^{\,F}_{i_2} - \vec{R}; \end{aligned} \quad (3.156)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{2\,i-1}\cdot \ddot{\vec{e}}^{\,0}_{i-1} + \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot (\mathbf{M}_{2\,i_1} + \mathbf{M}_{1\,i_2})\cdot \ddot{\vec{e}}_i + \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{1\,i+1}\cdot \ddot{\vec{e}}^{\,0}_{i+1} + \\ &+ \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{2\,i-1}\cdot \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot \vec{e}^{\,0}_{i-1} + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot (\mathbf{K}_{2\,i_1}\cdot \bar{\varepsilon}_{i-1} + \mathbf{K}_{1\,i_2}\cdot \bar{\varepsilon}_{i+1})\cdot \vec{e}_i + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{1\,i+1}\cdot \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot \vec{e}^{\,0}_{i+1} = \vec{Q}_i. \end{aligned} \quad (3.156)$$

Из уравнений (3.153) и (3.154) с учётом уравнения (3.156) составим систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{1\,i-1}\cdot \ddot{\vec{e}}^{\,0}_{i-1} + \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{1\,i_1}\cdot \ddot{\vec{e}}_i + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{1\,i-1}\cdot \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot \vec{e}^{\,0}_{i-1} + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{1\,i_1}\cdot \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot \vec{e}_i = \\ = \vec{Q}^{\,g}_{i-1} + \vec{Q}^{\,F}_{i-1} = \vec{Q}_{i-1}; \\ \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{2\,i-1}\cdot \ddot{\vec{e}}^{\,0}_{i-1} + \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot (\mathbf{M}_{2\,i_1} + \mathbf{M}_{1\,i_2})\cdot \ddot{\vec{e}}_i + \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{1\,i+1}\cdot \ddot{\vec{e}}^{\,0}_{i+1} + \\ + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{2\,i-1}\cdot \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot \vec{e}^{\,0}_{i-1} + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot (\mathbf{K}_{2\,i_1}\cdot \bar{\varepsilon}_{i-1} + \mathbf{K}_{1\,i_2}\cdot \bar{\varepsilon}_{i+1})\cdot \vec{e}_i + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{1\,i+1}\cdot \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot \vec{e}^{\,0}_{i+1} = \vec{Q}_i; \\ \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{2\,i_2}\cdot \ddot{\vec{e}}_i + \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{2\,i+1}\cdot \ddot{\vec{e}}^{\,0}_{i+1} + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{2i_2}\cdot \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot \vec{e}_i + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{2\,i+1}\cdot \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot \vec{e}^{\,0}_{i+1} = \\ = \vec{Q}^{\,g}_{i+1} + \vec{Q}^{\,F}_{i+1} = \vec{Q}_{i+1}. \end{cases} \quad (3.157)$$

Система уравнений (3.157) определяет соотношения между тремя узлами ГС. Её можно преобразовать к матричному виду, используя следующие блочные матрицы:

$$\vec{e} = \{\vec{e}^{\,0}_{i-1}\ \vec{e}_i\ \vec{e}^{\,0}_{i+1}\}^T, \quad (3.158)$$

$$\mathbf{M} = \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{1\,i-1} & \mathbf{M}_{1\,i_1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{2\,i-1} & \mathbf{M}_{2\,i_1} + \mathbf{M}_{1\,i_2} & \mathbf{M}_{1\,i+1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{2\,i_2} & \mathbf{M}_{2\,i+1} \end{bmatrix}, \quad (3.159)$$

$$\mathbf{K} = \frac{E \cdot A}{30 \cdot l} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}_{i-1} \cdot \mathbf{K}_{1\,i-1} & \bar{\varepsilon}_{i-1} \cdot \mathbf{K}_{1\,i_1} & \mathbf{0} \\ \bar{\varepsilon}_{i-1} \cdot \mathbf{K}_{2\,i-1} & \bar{\varepsilon}_{i-1} \cdot \mathbf{K}_{2\,i_1} + \bar{\varepsilon}_{i+1} \cdot \mathbf{K}_{1\,i_2} & \bar{\varepsilon}_{i+1} \cdot \mathbf{K}_{1\,i+1} \\ \mathbf{0} & \bar{\varepsilon}_{i+1} \cdot \mathbf{K}_{2\,i_2} & \bar{\varepsilon}_{i+1} \cdot \mathbf{K}_{2\,i+1} \end{bmatrix}, \quad (3.160)$$

$$\vec{Q} = \{\vec{Q}^0_{i-1}\ \vec{Q}_i\ \vec{Q}^0_{i+1}\}^T, \quad (3.161)$$

тогда система уравнений (3.157) имеет вид

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\vec{e}} + \mathbf{K} \cdot \vec{e} = \vec{Q}. \quad (3.162)$$

Обобщённые переменные ГС.

$$\vec{e} = \{\vec{r}^{\,0T}_{i-1}\ \vec{r}^{\,1T}_{i-1}\ \beta_{i-1}\ \vec{r}^{\,0T}_{i}\ \vec{r}^{\,1T}_{i}\ \beta_i\ \ \vec{r}^{\,0T}_{i+1}\ \vec{r}^{\,1T}_{i+1}\ \beta_{i+1}\}^T, \quad (3.163)$$

$$\vec{e} = \{x_{i-1}\ y_{i-1}\ z_{i-1}\ x'_{i-1}\ y'_{i-1}\ z'_{i-1}\ \beta_{i-1}\ x_i\ y_i\ z_i\ x'_i\ y'_i\ z'_i\ \beta_i\ x_{i+1}\ y_{i+1}\ z_{i+1}\ x'_{i+1}\ y'_{i+1}\ z'_{i+1}\ \beta_{i+1}\}^T. \quad (3.164)$$

Обобщённые массы ГС.

$$\mathbf{M} = \frac{\rho_l \cdot l}{420} \cdot \begin{bmatrix} 156\mathbf{I} & 22l\mathbf{I} & 0 & 54\mathbf{I} & -13l\mathbf{I} & 0 & 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 \\ 22l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 & 13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 & 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 140J_\beta/\rho_l & 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l & 0 & 0 & 0 \\ 54\mathbf{I} & 13l\mathbf{I} & 0 & & & & 54\mathbf{I} & -13l\mathbf{I} & 0 \\ -13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 & & \mathbf{M}_{1\,i_2} + \mathbf{M}_{2\,i_1} & & 13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l & & & & 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l \\ 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 & 54\mathbf{I} & 13l\mathbf{I} & 0 & 156\mathbf{I} & -22l\mathbf{I} & 0 \\ 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 & -13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 & -22l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l & 0 & 0 & 140J_\beta/\rho_l \end{bmatrix}, \quad (3.165)$$

$$\mathbf{M}_{1\,i_2} + \mathbf{M}_{2\,i_1} = \begin{Vmatrix} 312\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 \\ 0\mathbf{I} & 8l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 280J_\beta/\rho_l \end{Vmatrix}, \quad (3.166)$$

$$\mathbf{M} = \frac{\rho_l \cdot l}{420} \cdot \begin{bmatrix} 156\mathbf{I} & 22l\mathbf{I} & 0 & 54\mathbf{I} & -13l\mathbf{I} & 0 & 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 \\ 22l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 & 13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 & 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 140J_\beta/\rho_l & 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l & 0 & 0 & 0 \\ 54\mathbf{I} & 13l\mathbf{I} & 0 & 312\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 & 54\mathbf{I} & -13l\mathbf{I} & 0 \\ -13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 & 0\mathbf{I} & 8l^2\mathbf{I} & 0 & 13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l & 0 & 0 & 280J_\beta/\rho_l & 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l \\ 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 & 54\mathbf{I} & 13l\mathbf{I} & 0 & 156\mathbf{I} & -22l\mathbf{I} & 0 \\ 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 & -13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 & -22l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l & 0 & 0 & 140J_\beta/\rho_l \end{bmatrix}. \quad (3.167)$$

Обобщённые жёсткости элемента ГС.

$$\mathbf{K}=\frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot\begin{bmatrix} 36\mathbf{I} & 3l\mathbf{I} & 0 & -36\mathbf{I} & 3l\mathbf{I} & 0 & 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 \\ \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot 3l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 & \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot -3l\mathbf{I} & -l^2\mathbf{I} & 0 & 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -36\mathbf{I} & -3l\mathbf{I} & 0 & & & & -36\mathbf{I} & 3l\mathbf{I} & 0 \\ \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot 3l\mathbf{I} & -l^2\mathbf{I} & 0 & \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot\mathbf{K}_{2\,i_1}+\bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot\mathbf{K}_{1\,i_2} & & & \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot -3l\mathbf{I} & -l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & & & 0 & 0 & 0 \\ 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 & -36\mathbf{I} & -3l\mathbf{I} & 0 & 36\mathbf{I} & -3l\mathbf{I} & 0 \\ 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 & \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot 3l\mathbf{I} & -l^2\mathbf{I} & 0 & \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot -3l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.168)$$

$$\bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot\mathbf{K}_{2\,i_1}+\bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot\mathbf{K}_{1\,i_2}=\bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot\begin{Vmatrix} 36\mathbf{I} & -3l\mathbf{I} & 0 \\ -3l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}+\bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot\begin{Vmatrix} 36\mathbf{I} & 3l\mathbf{I} & 0 \\ 3l\mathbf{I} & 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}, \quad (3.169)$$

$$\bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot\mathbf{K}_{2\,i_1}+\bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot\mathbf{K}_{1\,i_2}=\begin{Vmatrix} (\bar{\varepsilon}_{i-1}+\bar{\varepsilon}_{i+1})\cdot 36\mathbf{I} & (\bar{\varepsilon}_{i+1}-\bar{\varepsilon}_{i-1})\cdot 3l\mathbf{I} & 0 \\ (\bar{\varepsilon}_{i+1}-\bar{\varepsilon}_{i-1})\cdot 3l\mathbf{I} & (\bar{\varepsilon}_{i-1}+\bar{\varepsilon}_{i+1})\cdot 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}. \quad (3.169)$$

$$\mathbf{K}=\frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot\begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot 36\mathbf{I} & \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot 3l\mathbf{I} & 0 & -\bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot 36\mathbf{I} & \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot 3l\mathbf{I} & 0 & 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 \\ \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot 3l\mathbf{I} & \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot 4l^2\mathbf{I} & 0 & -\bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot 3l\mathbf{I} & -\bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot l^2\mathbf{I} & 0 & 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot 36\mathbf{I} & -\bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot 3l\mathbf{I} & 0 & (\bar{\varepsilon}_{i-1}+\bar{\varepsilon}_{i+1})\cdot 36\mathbf{I} & (\bar{\varepsilon}_{i+1}-\bar{\varepsilon}_{i-1})\cdot 3l\mathbf{I} & 0 & -\bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot 36\mathbf{I} & \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot 3l\mathbf{I} & 0 \\ \bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot 3l\mathbf{I} & -\bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot l^2\mathbf{I} & 0 & (\bar{\varepsilon}_{i+1}-\bar{\varepsilon}_{i-1})\cdot 3l\mathbf{I} & (\bar{\varepsilon}_{i-1}+\bar{\varepsilon}_{i+1})\cdot 4l^2\mathbf{I} & 0 & -\bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot 3l\mathbf{I} & -\bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 & -\bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot 36\mathbf{I} & -\bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot 3l\mathbf{I} & 0 & \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot 36\mathbf{I} & -\bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot 3l\mathbf{I} & 0 \\ 0\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 & \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot 3l\mathbf{I} & -\bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot l^2\mathbf{I} & 0 & -\bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot 3l\mathbf{I} & \bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.170)$$

Обобщённые силы, действующие на ГС.

$$\vec{Q}=\{\vec{Q}^g_{i-1}+\vec{Q}^F_{i-1}\quad \vec{Q}^g_{i_1}+\vec{Q}^g_{i_2}+\vec{Q}^F_{i_1}+\vec{Q}^F_{i_2}\quad \vec{Q}^g_{i+1}+\vec{Q}^F_{i+1}\}^T, \quad (3.171)$$

$$\vec{Q}^g_i=\rho_l\cdot g_z\cdot l\cdot\{0\,0\,\frac{1}{2}\,0\,0\,\frac{l}{12}\,0\,0\,0\,\frac{1}{2}\,0\,0-\frac{l}{12}\,0\}^T, \quad (3.172)$$

$$\vec{Q}^g_{i-1}=\rho_l\cdot g_z\cdot l\cdot\{0\,0\,\frac{1}{2}\,0\,0\,\frac{l}{12}\,0\}^T, \quad (3.173)$$

$$\vec{Q}^g_{i+1}=\rho_l\cdot g_z\cdot l\cdot\{0\,0\,\frac{1}{2}\,0\,0-\frac{l}{12}\,0\}^T, \quad (3.174)$$

$$\vec{Q}^g_{i2}=\vec{Q}^g_{i-1}=\rho_l\cdot g_z\cdot l\cdot\{0\,0\,\frac{1}{2}\,0\,0\,\frac{l}{12}\,0\}^T, \quad (3.175)$$

$$\vec{Q}^g_{i1}=\vec{Q}^g_{i+1}=\rho_l\cdot g_z\cdot l\cdot\{0\,0\,\frac{1}{2}\,0\,0-\frac{l}{12}\,0\}^T, \quad (3.176)$$

$$\vec{Q}^g_{i_1}+\vec{Q}^g_{i_2}=\rho_l\cdot g_z\cdot l\cdot\{0\,0\,1\,0\,0\,0\,0\}^T, \quad (3.177)$$

$$\vec{Q}_i^F = l\cdot\{\frac{F_{xi-1}}{2}\ \frac{F_{yi-1}}{2}\ \frac{F_{zi-1}}{2}\ \frac{l\cdot F_{xi-1}}{12}\ \frac{l\cdot F_{yi-1}}{12}\ \frac{l\cdot F_{zi-1}}{12}\ 0$$
$$\frac{F_{xi}}{2}\ \frac{F_{yi}}{2}\ \frac{F_{zi}}{2} - \frac{l\cdot F_{xi}}{12} - \frac{l\cdot F_{yi}}{12} - \frac{l\cdot F_{zi}}{12}\ 0\}^T, \quad (3.178)$$

$$\vec{Q}_{i-1}^F = l\cdot\{\frac{F_{xi-1}}{2}\ \frac{F_{yi-1}}{2}\ \frac{F_{zi-1}}{2}\ \frac{l\cdot F_{xi-1}}{12}\ \frac{l\cdot F_{yi-1}}{12}\ \frac{l\cdot F_{zi-1}}{12}\ 0\}^T, \quad (3.179)$$

$$\vec{Q}_{i+1}^F = l\cdot\{\frac{F_{xi+1}}{2}\ \frac{F_{yi+1}}{2}\ \frac{F_{zi+1}}{2} - \frac{l\cdot F_{xi+1}}{12} - \frac{l\cdot F_{yi+1}}{12} - \frac{l\cdot F_{zi+1}}{12}\ 0\}^T, \quad (3.180)$$

$$\vec{Q}_{i2}^F = \vec{Q}_{i-1}^F = l\cdot\{\frac{F_{xi2}}{2}\ \frac{F_{yi2}}{2}\ \frac{F_{zi2}}{2}\ \frac{l\cdot F_{xi2}}{12}\ \frac{l\cdot F_{yi2}}{12}\ \frac{l\cdot F_{zi2}}{12}\ 0\}^T, \quad (3.181)$$

$$\vec{Q}_{i1}^F = \vec{Q}_{i+1}^F = l\cdot\{\frac{F_{xi1}}{2}\ \frac{F_{yi1}}{2}\ \frac{F_{zi1}}{2} - \frac{l\cdot F_{xi1}}{12} - \frac{l\cdot F_{yi1}}{12} - \frac{l\cdot F_{zi1}}{12}\ 0\}^T. \quad (3.182)$$

В узле ГС с номером i $\mathbf{F}_{i1} = \mathbf{F}_{i2}$, поэтому

$$\vec{Q}_{i_1}^F + \vec{Q}_{i_2}^F = l\cdot\{F_{xi}\ F_{yi}\ F_{zi}\ 000\ 0\}^T, \quad (3.183)$$

$$\vec{Q}_{i-1}^F = l\cdot\{\frac{F_{xi-1}}{2}\ \frac{F_{yi-1}}{2}\ \frac{\rho_l\cdot g_z + F_{zi-1}}{2}\ \frac{l\cdot F_{xi-1}}{12}\ \frac{l\cdot F_{yi-1}}{12}\ \frac{l\cdot(\rho_l\cdot g_z + F_{zi-1})}{12}\ 0\}^T, \quad (3.184)$$

$$\vec{Q}_{i_1}^g + \vec{Q}_{i_2}^g + \vec{Q}_{i_1}^F + \vec{Q}_{i_2}^F = l\cdot\{F_{xi}\ F_{yi}\ (\rho_l\cdot g_z + F_{zi})\ 000\ 0\}^T, \quad (3.185)$$

$$\vec{Q}_{i+1}^F = l\cdot\{\frac{F_{xi+1}}{2}\ \frac{F_{yi+1}}{2}\ \frac{\rho_l\cdot g_z + F_{zi+1}}{2} - \frac{l\cdot F_{xi+1}}{12} - \frac{l\cdot F_{yi+1}}{12} - \frac{l\cdot(\rho_l\cdot g_z + F_{zi+1})}{12}\ 0\}^T, \quad (3.186)$$

$$\vec{Q} = l\cdot\{\frac{F_{xi-1}}{2}\ \frac{F_{yi-1}}{2}\ \frac{\rho_l\cdot g_z + F_{zi-1}}{2}\ \frac{l\cdot F_{xi-1}}{12}\ \frac{l\cdot F_{yi-1}}{12}\ \frac{l\cdot(\rho_l\cdot g_z + F_{zi-1})}{12}\ 0$$
$$F_{xi}\ F_{yi}\ (\rho_l\cdot g_z + F_{zi})\ 000\ 0$$
$$\frac{F_{xi+1}}{2}\ \frac{F_{yi+1}}{2}\ \frac{\rho_l\cdot g_z + F_{zi+1}}{2} - \frac{l\cdot F_{xi+1}}{12} - \frac{l\cdot F_{yi+1}}{12} - \frac{l\cdot(\rho_l\cdot g_z + F_{zi+1})}{12}\ 0\}^T. \quad (3.187)$$

Уравнение (3.162) определяет связь между соседними элементами ГС, но для учёта граничных условий необходимо вводить в нём корректировку матриц с использованием множителей Лагранжа. Их определение усложняет решение задачи и требует дополнительного обращения матрицы масс вблизи границ ГС. Чтобы исключить эти проблемы, определим уравнение динамики i-го узла ГС, используя только второе уравнение системы (3.157):

$$\frac{\rho_l\cdot l}{420}\cdot\mathbf{M}_{2\,i-1}\cdot\ddot{\vec{e}}_{i-1}^{\,0} + \frac{\rho_l\cdot l}{420}\cdot(\mathbf{M}_{2\,i_1} + \mathbf{M}_{1\,i_2})\cdot\ddot{\vec{e}}_i + \frac{\rho_l\cdot l}{420}\cdot\mathbf{M}_{1\,i+1}\cdot\ddot{\vec{e}}_{i+1}^{\,0} +$$
$$+\frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot\mathbf{K}_{2\,i-1}\cdot\bar{\varepsilon}_{i-1}\cdot\vec{e}_{i-1}^{\,0} + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot(\mathbf{K}_{2\,i_1}\cdot\bar{\varepsilon}_{i-1} + \mathbf{K}_{1\,i_2}\cdot\bar{\varepsilon}_{i+1})\cdot\vec{e}_i +$$
$$+\frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot\mathbf{K}_{1\,i+1}\cdot\bar{\varepsilon}_{i+1}\cdot\vec{e}_{i+1}^{\,0} = \vec{Q}_i. \quad (3.188)$$

Вектор обобщённых координат запишем только для *i*-го узла ГС:

$$\vec{e}_i = \{\vec{r}_i^{\,0T}\vec{r}_i^{\,1T}\beta_i\}^T, \tag{3.189}$$

или в координатной форме

$$\vec{e}_i = \{x_i\, y_i\, z_i\, x_i'\, y_i'\, z_i'\, \beta_i\}^T. \tag{3.190}$$

Тогда уравнение (3.188) получит вид

$$\begin{aligned}&\frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{2\,i-1}\cdot \ddot{\vec{e}}_{i-1} + \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot (\mathbf{M}_{2\,i_1} + \mathbf{M}_{1\,i_2})\cdot \ddot{\vec{e}}_i + \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \mathbf{M}_{1\,i+1}\cdot \ddot{\vec{e}}_{i+1} + \\ &+ \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{2\,i-1}\cdot \overline{\varepsilon}_{i-1}\cdot \vec{e}_{i-1} + \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot (\mathbf{K}_{2\,i_1}\cdot \overline{\varepsilon}_{i-1} + \mathbf{K}_{1\,i_2}\cdot \overline{\varepsilon}_{i+1})\cdot \vec{e}_i + \\ &+ \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \mathbf{K}_{2\,i+1}\cdot \overline{\varepsilon}_{i+1}\cdot \vec{e}_{i+1} = \vec{Q}_i.\end{aligned} \tag{3.191}$$

В уравнении (3.191) обобщённые координаты в *i*–1 и *i*+1 узлах ГС могут быть определены из граничных условий или из системы уравнений (3.191), записанных для каждого узла ГС. В матричной форме уравнение (3.191) получит вид

$$\mathbf{M}_1\cdot \ddot{\vec{e}}_{i-1} + \mathbf{M}_2\cdot \ddot{\vec{e}}_i + \mathbf{M}_3\cdot \ddot{\vec{e}}_{i+1} + \mathbf{K}_1\cdot \vec{e}_{i-1} + \mathbf{K}_2\cdot \vec{e}_i + \mathbf{K}_3\cdot \vec{e}_{i+1} = \vec{Q}_i, \tag{3.192}$$

матрицы которого определяются формулами:

$$\mathbf{M}_1 = \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \begin{bmatrix} 54\mathbf{I} & 13l\mathbf{I} & 0 \\ -13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l \end{bmatrix}, \tag{3.193}$$

$$\mathbf{M}_2 = \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \begin{bmatrix} 312\mathbf{I} & 0\mathbf{I} & 0 \\ 0\mathbf{I} & 8l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 280J_\beta/\rho_l \end{bmatrix}, \tag{3.194}$$

$$\mathbf{M}_3 = \frac{\rho_l \cdot l}{420}\cdot \begin{bmatrix} 54\mathbf{I} & -13l\mathbf{I} & 0 \\ 13l\mathbf{I} & -3l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 70J_\beta/\rho_l \end{bmatrix}, \tag{3.195}$$

$$\mathbf{K}_1 = \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \begin{bmatrix} -\overline{\varepsilon}_{i-1}\cdot 36\mathbf{I} & -\overline{\varepsilon}_{i-1}\cdot 3l\mathbf{I} & 0 \\ \overline{\varepsilon}_{i-1}\cdot 3l\mathbf{I} & -\overline{\varepsilon}_{i-1}\cdot l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.196}$$

$$\mathbf{K}_2 = \frac{E\cdot A}{30\cdot l}\cdot \begin{bmatrix} (\overline{\varepsilon}_{i-1}+\overline{\varepsilon}_{i+1})\cdot 36\mathbf{I} & (\overline{\varepsilon}_{i+1}-\overline{\varepsilon}_{i-1})\cdot 3l\mathbf{I} & 0 \\ (\overline{\varepsilon}_{i+1}-\overline{\varepsilon}_{i-1})\cdot 3l\mathbf{I} & (\overline{\varepsilon}_{i-1}+\overline{\varepsilon}_{i+1})\cdot 4l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.197}$$

$$\mathbf{K}_3 = \frac{E \cdot A}{30 \cdot l} \cdot \begin{bmatrix} -\bar{\varepsilon}_{i+1} \cdot 36\mathbf{I} & \bar{\varepsilon}_{i+1} \cdot 3l\mathbf{I} & 0 \\ -\bar{\varepsilon}_{i+1} \cdot 3l\mathbf{I} & -\bar{\varepsilon}_{i+1} \cdot l^2\mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.198}$$

$$\vec{Q} = l \cdot \{F_{xi} F_{yi} (\rho_l \cdot g_z + F_{zi}) 000\ 0\}^T. \tag{3.199}$$

Силы сопротивления движению ГС.

Силы гидродинамического сопротивления жидкости движению ГС проще определить, если разделить их на две составляющие — тангенциальную ($\mathbf{F}_\tau$) и нормальную ($\mathbf{F}_n$) по отношению к поверхности ГС [82].

Сопротивление трения ГС (приведённое к узлу ГС с номером i) определяется тангенциальными составляющими гидродинамических сил, направленных вдоль элемента ГС и действующих на единицу её длины, которые зависят от скорости движения ГС и потока жидкости [82]:

$$\vec{F}_{\tau i} = 0{,}5 \cdot C_\tau \cdot \rho \cdot d \cdot \left| \left(\vec{V}_i - \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial t} \right) \cdot \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} \right| \cdot \left(\vec{V}_i - \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial t} \right) \cdot \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p}, \tag{3.200}$$

где C_τ — коэффициент гидродинамического сопротивления трения нити; ρ — плотность жидкости, кг/м^3; d — диаметр ГС, м; $\mathbf{V}_i$ — вектор скорости морского течения возле узла i ГС, м/с; $\mathbf{r}_i$ — радиус-вектор элемента ГС с вершиной в узле i ГС, м; $\partial\vec{r}_i/\partial p$ — направляющие косинусы ГС (3.58).

Вектор скорости морского течения задан его координатами V_{xi}, V_{yi} и V_{zi} в i-м узле ГС.

Радиус-вектор точки i определяется её координатами:

$$\vec{r}_i = x_i \cdot \vec{i} + y_i \cdot \vec{j} + z_i \cdot \vec{k}, \tag{3.201}$$

тогда

$$\frac{\partial \vec{r}_i}{\partial t} = \frac{\partial x_i}{\partial t} \cdot \vec{i} + \frac{\partial y_i}{\partial t} \cdot \vec{j} + \frac{\partial z_i}{\partial t} \cdot \vec{k}. \tag{3.202}$$

Используя вектор обобщённых координат (3.190), формулы (3.201) и (3.202) можно записать в виде:

$$\vec{r}_i = e_{1i} \cdot \vec{i} + e_{2i} \cdot \vec{j} + e_{3i} \cdot \vec{k}, \tag{3.203}$$

$$\frac{\partial \vec{r}_i}{\partial t} = \frac{\partial e_{1i}}{\partial t} \cdot \vec{i} + \frac{\partial e_{2i}}{\partial t} \cdot \vec{j} + \frac{\partial e_{3i}}{\partial t} \cdot \vec{k}, \tag{3.204}$$

а направляющие косинусы элемента ГС в виде

$$\frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} = e_{4i} \cdot \vec{i} + e_{5i} \cdot \vec{j} + e_{6i} \cdot \vec{k}. \tag{3.205}$$

Относительная скорость тангенциального потока жидкости:

$$\left(\vec{V}_i - \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial t} \right) \cdot \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} = \left(V_{x\,i} - \frac{\partial e_{1i}}{\partial t} \right) \cdot e_{4i} + \left(V_{y\,i} - \frac{\partial e_{2i}}{\partial t} \right) \cdot e_{5i} + \left(V_{z\,i} - \frac{\partial e_{3i}}{\partial t} \right) \cdot e_{6i}, \tag{3.206}$$

тогда составляющие вектора тангенциальных сил

$$F_{\tau xi} = 0{,}5 \cdot C_\tau \cdot \rho \cdot d \cdot \left| \left(V_{xi} - \frac{\partial e_{1i}}{\partial t} \right) \cdot e_{4i} \right| \cdot \left(V_{xi} - \frac{\partial e_{1i}}{\partial t} \right) \cdot e_{4i}, \quad (3.207)$$

$$F_{\tau yi} = 0{,}5 \cdot C_\tau \cdot \rho \cdot d \cdot \left| \left(V_{yi} - \frac{\partial e_{2i}}{\partial t} \right) \cdot e_{5i} \right| \cdot \left(V_{yi} - \frac{\partial e_{2i}}{\partial t} \right) \cdot e_{5i}, \quad (3.208)$$

$$F_{\tau zi} = 0{,}5 \cdot C_\tau \cdot \rho \cdot d \cdot \left| \left(V_{zi} - \frac{\partial e_{3i}}{\partial t} \right) \cdot e_{6i} \right| \cdot \left(V_{zi} - \frac{\partial e_{3i}}{\partial t} \right) \cdot e_{6i}. \quad (3.209)$$

Нормальные составляющие гидродинамических сил, действующих на единицу длины ГС, зависят от скорости движения ГС и потока жидкости [137]:

$$\vec{F}_{ni} = 0{,}5 \cdot C_f \cdot \rho \cdot d \cdot \left| \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} \times \left[\left(\vec{V}_i - \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial t} \right) \times \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} \right] \right| \cdot \left\{ \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} \times \left[\left(\vec{V}_i - \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial t} \right) \times \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} \right] \right\}, \quad (3.210)$$

где C_f — коэффициент гидродинамического сопротивления формы поперечного сечения ГС.

Преобразуем векторные произведения формулы (3.210), используя вектор обобщённых координат (3.190):

$$\left(\vec{V}_i - \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial t} \right) \times \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ V_{xi} - \dfrac{\partial e_{1i}}{\partial t} & V_{yi} - \dfrac{\partial e_{2i}}{\partial t} & V_{zi} - \dfrac{\partial e_{3i}}{\partial t} \\ e_{4i} & e_{5i} & e_{6i} \end{vmatrix}, \quad (3.211)$$

тогда

$$\left(\vec{V}_i - \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial t} \right) \times \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} = \left[\left(V_{yi} - \frac{\partial e_{2i}}{\partial t} \right) \cdot e_{6i} - \left(V_{zi} - \frac{\partial e_{3i}}{\partial t} \right) \cdot e_{5i} \right] \cdot \vec{i} -$$

$$- \left[\left(V_{xi} - \frac{\partial e_{1i}}{\partial t} \right) \cdot e_{6i} - \left(V_{zi} - \frac{\partial e_{3i}}{\partial t} \right) \cdot e_{4i} \right] \cdot \vec{j} + \left[\left(V_{xi} - \frac{\partial e_{1i}}{\partial t} \right) \cdot e_{5i} - \left(V_{yi} - \frac{\partial e_{2i}}{\partial t} \right) \cdot e_{4i} \right] \cdot \vec{k}, \quad (3.212)$$

$$\frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} \times \left[\left(\vec{V}_i - \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial t} \right) \times \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} \right] =$$

$$= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ e_{4i} & e_{5i} & e_{6i} \\ \left[\left(V_{yi} - \dfrac{\partial e_{2i}}{\partial t} \right) \cdot e_{6i} - \left(V_{zi} - \dfrac{\partial e_{3i}}{\partial t} \right) \cdot e_{5i} \right] & - \left[\left(V_{xi} - \dfrac{\partial e_{1i}}{\partial t} \right) \cdot e_{6i} - \left(V_{zi} - \dfrac{\partial e_{3i}}{\partial t} \right) \cdot e_{4i} \right] & \left[\left(V_{xi} - \dfrac{\partial e_{1i}}{\partial t} \right) \cdot e_{5i} - \left(V_{yi} - \dfrac{\partial e_{2i}}{\partial t} \right) \cdot e_{4i} \right] \end{vmatrix}, \quad (3.213)$$

или

$$\frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} \times \left[\left(\vec{V}_i - \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial t} \right) \times \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} \right] = \left\{ e_{5i} \left[\left(V_{xi} - \frac{\partial e_{1i}}{\partial t} \right) \cdot e_{5i} - \left(V_{yi} - \frac{\partial e_{2i}}{\partial t} \right) \cdot e_{4i} \right] + e_{6i} \left[\left(V_{xi} - \frac{\partial e_{1i}}{\partial t} \right) \cdot e_{6i} - \left(V_{zi} - \frac{\partial e_{3i}}{\partial t} \right) \cdot e_{4i} \right] \right\} \cdot \vec{i} +$$

$$+ \left\{ - e_{4i} \left[\left(V_{xi} - \frac{\partial e_{1i}}{\partial t} \right) \cdot e_{5i} - \left(V_{yi} - \frac{\partial e_{2i}}{\partial t} \right) \cdot e_{4i} \right] + e_{6i} \left[\left(V_{yi} - \frac{\partial e_{2i}}{\partial t} \right) \cdot e_{6i} - \left(V_{zi} - \frac{\partial e_{3i}}{\partial t} \right) \cdot e_{5i} \right] \right\} \cdot \vec{j} -$$

$$- \left\{ e_{4i} \left[\left(V_{xi} - \frac{\partial e_{1i}}{\partial t} \right) \cdot e_{6i} - \left(V_{zi} - \frac{\partial e_{3i}}{\partial t} \right) \cdot e_{4i} \right] + e_{5i} \left[\left(V_{yi} - \frac{\partial e_{2i}}{\partial t} \right) \cdot e_{6i} - \left(V_{zi} - \frac{\partial e_{3i}}{\partial t} \right) \cdot e_{5i} \right] \right\} \cdot \vec{k}. \quad (3.213)$$

Составляющие нормальных гидродинамических сил

$$F_{n\,xi} = 0{,}5 \cdot C_f \cdot \rho \cdot d \cdot |V_{xv}| \cdot V_{xv}, \tag{3.214}$$

где

$$V_{xv} = e_{5i}\left[\left(V_{xi} - \frac{\partial e_{1i}}{\partial t}\right)\cdot e_{5i} - \left(V_{yi} - \frac{\partial e_{2i}}{\partial t}\right)\cdot e_{4i}\right] + e_{6i}\left[\left(V_{xi} - \frac{\partial e_{1i}}{\partial t}\right)\cdot e_{6i} - \left(V_{zi} - \frac{\partial e_{3i}}{\partial t}\right)\cdot e_{4i}\right], \tag{3.215}$$

$$F_{n\,yi} = 0{,}5 \cdot C_f \cdot \rho \cdot d \cdot |V_{yv}| \cdot V_{yv}, \tag{3.216}$$

где

$$V_{yv} = -e_{4i}\left[\left(V_{xi} - \frac{\partial e_{1i}}{\partial t}\right)\cdot e_{5i} - \left(V_{yi} - \frac{\partial e_{2i}}{\partial t}\right)\cdot e_{4i}\right] + e_{6i}\left[\left(V_{yi} - \frac{\partial e_{2i}}{\partial t}\right)\cdot e_{6i} - \left(V_{zi} - \frac{\partial e_{3i}}{\partial t}\right)\cdot e_{5i}\right], \tag{3.217}$$

$$F_{n\,zi} = 0{,}5 \cdot C_f \cdot \rho \cdot d \cdot |V_{zv}| \cdot V_{zv}, \tag{3.218}$$

где

$$V_{zv} = -e_{4i}\left[\left(V_{xi} - \frac{\partial e_{1i}}{\partial t}\right)\cdot e_{6i} - \left(V_{zi} - \frac{\partial e_{3i}}{\partial t}\right)\cdot e_{4i}\right] - e_{5i}\left[\left(V_{yi} - \frac{\partial e_{2i}}{\partial t}\right)\cdot e_{6i} - \left(V_{zi} - \frac{\partial e_{3i}}{\partial t}\right)\cdot e_{5i}\right], \tag{3.219}$$

Нормальные составляющие сил, действующих на единицу длины ГС со стороны подводной преграды и приведённые к i-тому узлу ГС, можно определить по формуле

$$\vec{G}_{n\,i} = \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} \times \left(\vec{G}_i \times \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p}\right), \tag{3.220}$$

где $\vec{G}_i$ — вектор силы со стороны преграды, заданный координатами G_{xi}, G_{yi}, G_{zi}.

Преобразуем векторные произведения в формуле (3.178):

$$\vec{G}_i \times \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ G_{xi} & G_{yi} & G_{zi} \\ e_{4i} & e_{5i} & e_{6i} \end{vmatrix}, \tag{3.221}$$

$$\vec{G}_i \times \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} = \left[G_{yi} \cdot e_{6i} - G_{zi} \cdot e_{5i}\right]\cdot \vec{i} - \left[G_{xi} \cdot e_{6i} - G_{zi} \cdot e_{4i}\right]\cdot \vec{j} + \left[G_{xi} \cdot e_{5i} - G_{yi} \cdot e_{4i}\right]\cdot \vec{k}, \tag{3.222}$$

$$\frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} \times \left(\vec{G}_i \times \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p}\right) = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ e_{4i} & e_{5i} & e_{6i} \\ \left[G_{yi} \cdot e_{6i} - G_{zi} \cdot e_{5i}\right] & -\left[G_{xi} \cdot e_{6i} - G_{zi} \cdot e_{4i}\right] & \left[G_{xi} \cdot e_{5i} - G_{yi} \cdot e_{4i}\right] \end{vmatrix}, \tag{3.223}$$

$$\vec{G}_{ni} = \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p} \times \left(\vec{G}_i \times \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial p}\right) = \left\{e_{5i}\left[G_{xi} \cdot e_{5i} - G_{yi} \cdot e_{4i}\right] + e_{6i}\left[G_{xi} \cdot e_{6i} - G_{zi} \cdot e_{4i}\right]\right\}\cdot \vec{i} + \left\{-e_{4i}\left[G_{xi} \cdot e_{5i} - G_{yi} \cdot e_{4i}\right] + e_{6i}\left[G_{yi} \cdot e_{6i} - G_{zi} \cdot e_{5i}\right]\right\}\cdot \vec{j} + \left\{-e_{4i}\left[G_{xi} \cdot e_{6i} - G_{zi} \cdot e_{4i}\right] - e_{5i}\left[G_{yi} \cdot e_{6i} - G_{zi} \cdot e_{5i}\right]\right\}\cdot \vec{k}. \tag{3.224}$$

Внешняя сила $\mathbf{G}_{\tau i}$ является реакцией ГС на взаимодействие с преградами (трение о преграду). Её модуль пропорционален нормальной силе давления ГС на преграду с коэффициентом трения f_G:

$$G_{\tau i} = f_G \cdot \mathrm{G}_{ni}, \tag{3.225}$$

где

$$\left|G_{ni}\right| = \sqrt{\begin{array}{l}\left\{e_{5i}\left[G_{xi}\cdot e_{5i} - G_{yi}\cdot e_{4i}\right] + e_{6i}\left[G_{xi}\cdot e_{6i} - G_{zi}\cdot e_{4i}\right]\right\}^2 + \\ + \left\{-e_{4i}\left[G_{xi}\cdot e_{5i} - G_{yi}\cdot e_{4i}\right] + e_{6i}\left[G_{yi}\cdot e_{6i} - G_{zi}\cdot e_{5i}\right]\right\}^2 + \\ + \left\{-e_{4i}\left[G_{xi}\cdot e_{6i} - G_{zi}\cdot e_{4i}\right] - e_{5i}\left[G_{yi}\cdot e_{6i} - G_{zi}\cdot e_{5i}\right]\right\}^2.\end{array}} \tag{3.226}$$

Преграда может быть неподвижна или двигаться с заданной скоростью, тогда элемент ГС будет испытывать кинематические ограничения перемещения. В этом случае внешнюю силу $\mathbf{G}_i$ можно определить в i — том узле по геометрии изгиба ГС [392, с. 11].

Динамика морской привязной системы.

Математическая модель динамики морской привязной системы (МПС) включает не только уравнения ГС, но и уравнения динамики СН и ПА, движение которых определяет граничные условия в узлах ГС с номерами $i = 0$ и $i = N$. Будем считать, что узел ГС с номером $i = 0$ закреплён на СН, а узел ГС с номером $i = N$ закреплён на ПА [460].

СН и ПА отличаются только параметрами, поэтому уравнения их динамики имеют одинаковый вид. Будем считать, что СН и ПА представляют собой абсолютно жёсткие стержни, положение которых в пространстве определяется координатами их центра массы (x_i, y_i, z_i), курсовым углом ($\varphi_{k\,i}$), углом дифферента ($\varphi_{d\,i}$) и крена ($\varphi_{kr\,i}$). Длина стержней (L_i) равна длине СН или ПА, а положение центра массы определяется расстоянием до него от кормы (L_{ki}). Положение и ориентация этих переменных и параметров показаны на рис. 3.17.

Система уравнений динамики СН или ПА состоит из шести уравнений:

$$M_{ci}\cdot\ddot{x}_i = F_{cxi}, \tag{3.227}$$

$$M_{ci}\cdot\ddot{y}_i = F_{cyi}, \tag{3.228}$$

$$M_{ci}\cdot\ddot{z}_i = F_{czi}, \tag{3.229}$$

$$J_{ki}\cdot\ddot{\varphi}_{ki} = M_{zi}, \tag{3.230}$$

$$J_{di}\cdot\ddot{\varphi}_{di} = M_{di}, \tag{3.231}$$

$$J_{kri}\cdot\ddot{\varphi}_{kri} = M_{kri}, \tag{3.232}$$

где M_{ci} — масса судна; J_{ki}, J_{di}, J_{kri} — моменты инерции судна относительно осей поворота, дифферента и крена; F_{cxi}, F_{cyi}, F_{czi}, M_{zi}, M_{di}, M_{kri} — внешние силы и крутящие моменты, действующие на судно.

Часть внешних сил, действующих на СН или ПА, зависят от параметров и профиля волнения моря. В простейшем случае профиль волны с длинным гребнем задают в виде функции (рис. 3.18) [164]:

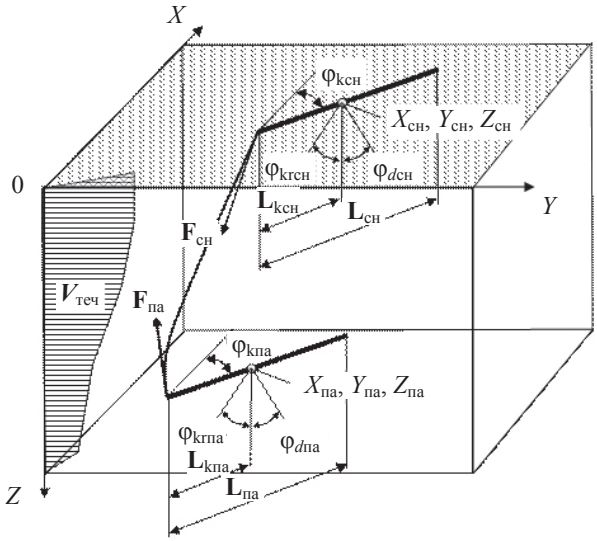


Рис. 3.17. Схема геометрических параметров СН и ПА

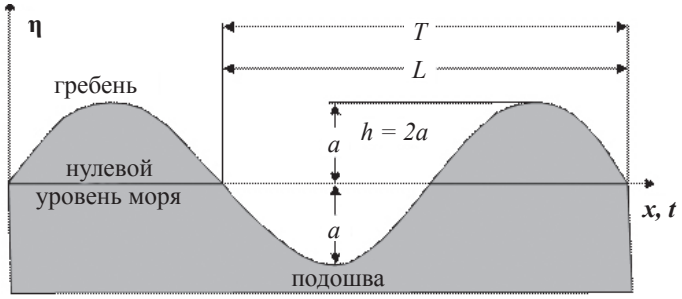


Рис. 3.18. Профиль волны с длинным гребнем

$$\eta = a \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t + \varepsilon) \tag{3.233}$$

или

$$\eta = a \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t + \varepsilon), \tag{3.234}$$

где h — высота волны; L — длина волны; T — период волны; k — волновое число, равное $2\pi/L$; c — фазовая скорость волны, равная L/T ; f — частота волны, равная $1/T$; ω — круговая частота, равная $2\pi/T$; ε — фазовый сдвиг; d — глубина воды, измеряемая от среднего уровня моря; β — возраст волны, равный c/W, где W — скорость ветра; E — энергия волны на единицу площади моря; r — радиус орбитальных путей частиц воды на глубине z; U — групповая скорость волн.

В общем случае для моря с переменной глубиной формула для фазовой скорости волны имеет вид

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} th(\frac{2\pi \cdot d}{L})}, \tag{3.235}$$

Для глубокого моря, когда глубина воды больше половины длины волны, множитель $\frac{2\pi \cdot d}{L} \approx 1$, тогда формула (3.234) принимает вид

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}. \tag{3.236}$$

Элементы волн на глубокой воде (длина, период и фазовая скорость волны) связаны между собой соотношением (3.235), а также простыми соотношениями

$$L = \frac{gT^2}{2\pi}, \tag{3.237}$$

$$T = \sqrt{\frac{2\pi \cdot L}{g}}. \tag{3.238}$$

Используя формулы (3.236)–(3.238), по одному из параметров волны можно определить два остальных.

Если направление волны не совпадает с направлением оси x и отклоняется от неё на угол θ, тогда профиль синусоидальной волны определяется по формуле

$$\eta = a \cdot \sin(k_x \cdot x + k_y \cdot y - \omega \cdot t), \tag{3.239}$$

где k_x — проекция волнового числа k на ось x, равная $2\pi \cos\theta/L$; k_y — проекция волнового числа k на ось y, равная $2\pi \sin\theta/L$.

Основные статистические характеристики высоты волн связаны с энергией волн E следующими соотношениями [164]:

$$h = 1{,}414 \cdot \sqrt{E}, \tag{3.240}$$

$$\bar{h} = 1{,}772 \cdot \sqrt{E}, \tag{3.241}$$

$$h_{1/3} = 2{,}832 \cdot \sqrt{E}, \tag{3.242}$$

$$h_{1/10} = 3{,}600 \cdot \sqrt{E}, \tag{3.243}$$

где h — высота волны наибольшей повторяемости; $\bar{h}$ — средняя высота волны; $h_{1/3}$ — средняя высота из трети наибольших высот волн в выборке, $h_{1/10}$ — средняя из 1/10 наибольших высот волн в выборке.

Энергия полностью развитого волнения определяется по формуле

$$E = 1{,}21 \cdot 10^{-6} \cdot W^5. \tag{3.244}$$

Предельный период полностью развитого волнения будет равен [161]

$$T = 0{,}526 \cdot W, \tag{3.245}$$

а предельная высота для волн 5%-ной обеспеченности

$$h_{1/10} = 0{,}0205 \cdot W^2. \tag{3.246}$$

Разработанная математическая модель МПС с ГС позволяет решать следующие задачи:

1. Определять изменение формы ГС и сил её натяжения в процессе маневрирования СН и ПА с учётом морских волн, подводных течений, ветровых нагрузок на СН, глубины моря и её изменения в заданной акватории, массы и упругих свойств ГС.

2. Определять относительное положение СН и ПА в процессе их маневрирования.

3. Определять резонансные режимы растяжения ГС и максимальные нагрузки на ГС для оценки её прочности в процессе маневрирования СН и ПА.

4. Определять режимы маневрирования МПС, приводящие к образованию петель («колышек») на ГС. Обычно образуются на растянутых ГС при появлении в них «слабины» и наличии крутящего момента (крутящий момент зависит от натяжения ГС) [127].

5. Определять режимы маневрирования МПС, приводящие к вибрации плохообтекаемых ГС в потоке.

Алгоритм решения системы уравнений математической модели.

Метод решения системы уравнений математической модели [460].

Систему уравнений (3.192) можно решить, используя численные методы. С учётом полученных матриц уравнение (3.192) имеет вид

$$\mathbf{M}_1 \cdot \ddot{\vec{e}}_{i-1} + \mathbf{M}_2 \cdot \ddot{\vec{e}}_i + \mathbf{M}_3 \cdot \ddot{\vec{e}}_{i+1} + \mathbf{K}_1 \cdot \vec{e}_{i-1} + \mathbf{K}_2 \cdot \vec{e}_i + \mathbf{K}_3 \cdot \vec{e}_{i+1} = \vec{Q}_i. \qquad (3.247)$$

Производную второго порядка по времени вектора обобщённых координат необходимо заменить её дискретным аналогом:

$$\ddot{\vec{e}} \approx \frac{\dfrac{\vec{e}^{\,n+1} - \vec{e}^{\,n}}{\Delta t_{n+1}} - \dfrac{\vec{e}^{\,n} - \vec{e}^{\,n-1}}{\Delta t_n}}{\dfrac{1}{2}(\Delta t_n + \Delta t_{n+1})}, \qquad (3.248)$$

где n — номер расчётного шага по времени t;

$$\Delta t_n = t_n - t_{n-1}; \qquad (3.249)$$

$$\Delta t_{n+1} = t_{n+1} - t_n. \qquad (3.250)$$

В результате преобразования (3.248)

$$\ddot{\vec{e}} \approx \frac{2}{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1})}\left(\frac{\vec{e}^{\,n+1} - \vec{e}^{\,n}}{\Delta t_{n+1}} - \frac{\vec{e}^{\,n} - \vec{e}^{\,n-1}}{\Delta t_n}\right), \qquad (3.251)$$

$$\ddot{\vec{e}} \approx \frac{2}{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \cdot \Delta t_{n+1}} \vec{e}^{\,n+1} - \frac{2}{\Delta t_{n+1} \cdot \Delta t_n} \vec{e}^{\,n} + \frac{2}{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \cdot \Delta t_n} \vec{e}^{\,n-1}. \qquad (3.251)$$

Вводя обозначения коэффициентов уравнения (3.251)

$$C_{t0} = \frac{2}{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \cdot \Delta t_n}, \qquad (3.252)$$

$$C_{t1} = \frac{2}{\Delta t_{n+1} \cdot \Delta t_n}, \qquad (3.253)$$

$$C_{t2} = \frac{2}{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \cdot \Delta t_{n+1}}, \tag{3.254}$$

выражение (3.251) преобразуем к виду

$$\ddot{\vec{e}} \approx C_{t2}\vec{e}^{n+1} - C_{t1}\vec{e}^{n} + C_{t0}\vec{e}^{n-1}. \tag{3.255}$$

С учётом (3.255) преобразуем уравнение (3.247):

$$\mathbf{M}_1 \cdot (C_{t2}\vec{e}^{n+1} - C_{t1}\vec{e}^{n} + C_{t0}\vec{e}^{n-1})_{i-1} + \mathbf{M}_2 \cdot (C_{t2}\vec{e}^{n+1} - C_{t1}\vec{e}^{n} + C_{t0}\vec{e}^{n-1})_{i} +$$
$$+ \mathbf{M}_3 \cdot (C_{t2}\vec{e}^{n+1} - C_{t1}\vec{e}^{n} + C_{t0}\vec{e}^{n-1})_{i+1} + \mathbf{K}_1 \cdot \vec{e}^{n}_{i-1} + \mathbf{K}_2 \cdot \vec{e}^{n}_{i} + \mathbf{K}_3 \cdot \vec{e}^{n}_{i+1} = \vec{Q}^{n}_{i}. \tag{3.256}$$

Матричное алгебраическое уравнение (3.256) записано в неявной форме с использованием трёх временных слоёв. Для его решения используем двухшаговый итерационный метод. На первом шаге будем считать, что матрицы $\mathbf{M}_1$ и $\mathbf{M}_3$ нулевые, тогда уравнение (3.256) принимает явную форму

$$\mathbf{M}_2 \cdot (C_{t2}\widetilde{\vec{e}}^{n+1} - C_{t1}\vec{e}^{n} + C_{t0}\vec{e}^{n-1})_{i} + \mathbf{K}_1 \cdot \vec{e}^{n}_{i-1} + \mathbf{K}_2 \cdot \vec{e}^{n}_{i} + \mathbf{K}_3 \cdot \vec{e}^{n}_{i+1} = \vec{Q}^{n}_{i}, \tag{3.257}$$

в котором знаком «тильда» отмечена приближённая величина вектора обобщённых координат на $n+1$ слое по времени. Решение уравнения (3.257) можно получить по методу обратной матрицы:

$$\mathbf{M}_2^{-1} \cdot \mathbf{M}_2 \cdot (C_{t2}\widetilde{\vec{e}}^{n+1} - C_{t1}\vec{e}^{n} + C_{t0}\vec{e}^{n-1})_{i} +$$
$$+ \mathbf{M}_2^{-1} \cdot \mathbf{K}_1 \cdot \vec{e}^{n}_{i-1} + \mathbf{M}_2^{-1} \cdot \mathbf{K}_2 \cdot \vec{e}^{n}_{i} + \mathbf{M}_2^{-1} \cdot \mathbf{K}_3 \cdot \vec{e}^{n}_{i+1} = \mathbf{M}_2^{-1} \cdot \vec{Q}^{n}_{i}, \tag{3.258}$$

$$\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}{}_{i} = \frac{C_{t1}}{C_{t2}}\vec{e}^{\,n}{}_{i} - \frac{C_{t0}}{C_{t2}}\vec{e}^{\,n-1}{}_{i} +$$
$$+ \frac{1}{C_{t2}}(\mathbf{M}_2^{-1} \cdot \vec{Q}^{n}_{i} - \mathbf{M}_2^{-1} \cdot \mathbf{K}_1 \cdot \vec{e}^{\,n}{}_{i-1} - \mathbf{M}_2^{-1} \cdot \mathbf{K}_2 \cdot \vec{e}^{\,n}{}_{i} - \mathbf{M}_2^{-1} \cdot \mathbf{K}_3 \cdot \vec{e}^{\,n}{}_{i+1}). \tag{3.258}$$

Вводя обозначения коэффициентов уравнения (3.258)

$$C_{12} = \frac{C_{t1}}{C_{t2}} = \frac{\dfrac{2}{\Delta t_{n+1} \cdot \Delta t_n}}{\dfrac{2}{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \cdot \Delta t_{n+1}}} = \frac{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \cdot \Delta t_{n+1}}{\Delta t_{n+1} \cdot \Delta t_n} = \frac{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1})}{\Delta t_n}, \tag{3.259}$$

$$C_{02} = \frac{C_{t0}}{C_{t2}} = \frac{\dfrac{2}{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \cdot \Delta t_n}}{\dfrac{2}{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \cdot \Delta t_{n+1}}} = \frac{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \cdot \Delta t_{n+1}}{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \cdot \Delta t_n} = \frac{\Delta t_{n+1}}{\Delta t_n}, \tag{3.260}$$

$$C_2 = \frac{1}{C_{t2}} = \frac{1}{\dfrac{2}{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \cdot \Delta t_{n+1}}} = \frac{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \cdot \Delta t_{n+1}}{2}, \tag{3.261}$$

уравнение (3.258) получит вид:

$$\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}_{i} = C_{12}\vec{e}^{\,n}_{i} + C_{02}\vec{e}^{\,n-1}_{i} + C_2 \cdot (\mathbf{M}_2^{-1} \cdot \vec{Q}^{n}_{i} - \mathbf{M}_2^{-1} \cdot \mathbf{K}_1 \cdot \vec{e}^{\,n}_{i-1} - \mathbf{M}_2^{-1} \cdot \mathbf{K}_2 \cdot \vec{e}^{\,n}_{i} - \mathbf{M}_2^{-1} \cdot \mathbf{K}_3 \cdot \vec{e}^{\,n}_{i+1}). \tag{3.262}$$

Корректировка (уточнение и регуляризация) вектора обобщённых координат выполняется с его использованием в уравнении (3.256), которое преобразовано по методу Абарбанеля и Цваса [82] к виду

$$\mathbf{M}_1\cdot(C_{t2}\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}-C_{t1}\vec{e}^{\,n}+C_{t0}\vec{e}^{\,n-1})_{i-1}+\mathbf{M}_2\cdot(C_{t2}\vec{\boldsymbol{e}}^{\,n+1}-C_{t1}\vec{e}^{\,n}+C_{t0}\vec{e}^{\,n-1})_i+$$
$$+\mathbf{M}_3\cdot(C_{t2}\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}-C_{t1}\vec{e}^{\,n}+C_{t0}\vec{e}^{\,n-1})_{i+1}+\mathbf{K}_1\cdot\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}_{i-1}+\mathbf{K}_2\cdot\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}_{i}+\mathbf{K}_3\cdot\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}_{i+1}=\vec{Q}^{\,n}_i. \quad (3.263)$$

Уравнение (3.263) также решаем по методу обратной матрицы

$$\mathbf{M}_2^{-1}\cdot\mathbf{M}_1\cdot(C_{t2}\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}-C_{t1}\vec{e}^{\,n}+C_{t0}\vec{e}^{\,n-1})_{i-1}+\mathbf{M}_2^{-1}\cdot\mathbf{M}_2\cdot(C_{t2}\vec{\boldsymbol{e}}^{\,n+1}-C_{t1}\vec{e}^{\,n}+C_{t0}\vec{e}^{\,n-1})_i+$$
$$+\mathbf{M}_2^{-1}\cdot\mathbf{M}_3\cdot(C_{t2}\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}-C_{t1}\vec{e}^{\,n}+C_{t0}\vec{e}^{\,n-1})_{i+1}+$$
$$+\mathbf{M}_2^{-1}\cdot\mathbf{K}_1\cdot\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}_{i-1}+\mathbf{M}_2^{-1}\cdot\mathbf{K}_2\cdot\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}_{i}+\mathbf{M}_2^{-1}\cdot\mathbf{K}_3\cdot\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}_{i+1}=\mathbf{M}_2^{-1}\cdot\vec{Q}^{\,n}_i. \quad (3.264)$$

$$\vec{e}^{\,n+1}_i=C_{12}\vec{e}^{\,n}_i+C_{02}\vec{e}^{\,n-1}_i+C_2\cdot[\mathbf{M}_2^{-1}\cdot\vec{Q}^{\,n}_i-\mathbf{M}_2^{-1}\cdot\mathbf{K}_1\cdot\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}_{i-1}-\mathbf{M}_2^{-1}\cdot\mathbf{K}_2\cdot\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}_{i}-$$
$$-\mathbf{M}_2^{-1}\cdot\mathbf{K}_3\cdot\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}_{i+1}-\mathbf{M}_2^{-1}\cdot\mathbf{M}_1\cdot(C_{t2}\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}-C_{t1}\vec{e}^{\,n}+C_{t0}\vec{e}^{\,n-1})_{i-1}-$$
$$-\mathbf{M}_2^{-1}\cdot\mathbf{M}_3\cdot(C_{t2}\widetilde{\vec{e}}^{\,n+1}-C_{t1}\vec{e}^{\,n}+C_{t0}\vec{e}^{\,n-1})_{i+1}]. \quad (3.264)$$

Последовательное применение формул (3.262) и (3.264) позволяет определить вектор обобщённых координат во всех узлах ГС на $n+1$ слое по времени.

Векторы обобщённых координат в граничных узлах ГС ($i=0$ и $i=N$) на $(n+1)$ слое по времени можно определить из уравнений (3.227)–(3.232), считая, что обобщённые координаты в граничных узлах ГС ($i=1$ и $i=N-1$) на $n+1$ слое по времени определены по формулам (3.262) и (3.264). Аналогичным образом можно получить формулы для решения уравнений (3.227)–(3.232). Уравнение (3.227) преобразовали по аналогии с уравнением (3.165), в результате на этапе «предиктор» оно получило вид

$$\widetilde{x}^{\,n+1}_i=C_{12}\cdot x^{\,n}_i-C_{02}\cdot x^{\,n-1}_i+C_2\cdot F^{\,n}_{cxi}/\mathbf{M}_{ci}, \quad (3.265)$$

а на этапе «корректор»

$$x^{\,n+1}_i=C_{12}\cdot x^{\,n}_i-C_{02}\cdot x^{\,n-1}_i+C_2\cdot\widetilde{F}^{\,n+1}_{cxi}/\mathbf{M}_{ci}. \quad (3.266)$$

Формулы для решения уравнений (3.228)–(3.232) имеют подобный вид.

Величину Δt необходимо задать, используя принцип причинно-следственной связи между волновыми процессами деформирования ГС [37, 75, 174]. Этот принцип учитывается, если выполняется условие Куранта-Фридрихса-Леви [37, 75, 174], определяющее устойчивость итерационного вычислительного процесса по формулам (3.262) и (3.264).

Согласно условию Куранта-Фридрихса-Леви

$$\Delta t\le C_k\cdot l/\max(C_T;C_M;C_\beta), \quad (3.267)$$

где C_T — скорость продольных волн растяжения ГС, м/с; C_M — скорость поперечных волн изгиба ГС, м/с; C_β — скорость сдвиговых волн кручения ГС, м/с; C_k — коэффициент запаса устойчивости вычислений ($C_k\le 1$).

Скорости волн определяются по формулам

$$C_T = \sqrt{\frac{T}{\rho_l}}, \tag{3.268}$$

$$C_M = \sqrt{\frac{E \cdot J \cdot l}{J_M}}, \tag{3.269}$$

$$C_\beta = \sqrt{\frac{G^* \cdot J_p \cdot l}{J_\varphi}}. \tag{3.270}$$

Алгоритм моделирования динамики МПС.

Полученные формулы (3.262) и (3.264) решения системы уравнений (3.228) позволяют составить алгоритм моделирования динамики ГС под действием внешних воздействий на неё. Алгоритм состоит из следующих основных этапов [460]:

1. Ввод основных параметров ГС, СН, ПА и взаимодействующих с ними преград, описанных в разделе «Параметры математической модели» ρ, l_0, N, d_0, E, G^*, M_a, C_τ, C_f, f_G, $T_{\max}$, t_m.

2. Ввод основных функций, определяющих волнение моря, кинематику преград, скорость морского течения и внешних сил, описанных в разделе «Функции внешних воздействий на ГС».

3. Задание начальных и граничных условий для ГС, СН и ПА.

4. Дискретизация ГС и вычисление искомых функций в узлах сетки, в соответствии с заданными начальными и граничными условиями.

5. Определение шага изменения времени Δt и момента времени на $n + 1$ слое $t^{k+1} = t^k + \Delta t$.

6. Проверка условия окончания вычислений $t^{n+1} \le t_m$. Если условие выполнено, тогда переходим к пункту 7 данного алгоритма для вычисления искомых функций на $n + 1$ слое времени, иначе считаем процесс вычисления оконченным и переходим к пункту 12.

7. Расчёт изменения координат узлов ГС на этапе предиктор по формуле (3.262).

8. Корректировка изменения координат узлов ГС на этапе регуляризации по формуле (3.264).

9. Вычисление характеристик МПС на $n + 1$ временном слое по времени.

10. Запись результатов вычисления характеристик МПС на $n + 1$ временном слое по времени в заданные файлы.

11. Переход к пункту 5.

12. Окончание вычислений.

Блок-схема разработанного алгоритма показана на рисунке 3.19.

Полученный алгоритм моделирования динамики ГС позволяет перейти в дальнейшем к разработке компьютерной программы, описывающей динамику МПС. Разработанные математическая модель динамики гибких связей и алгоритм математической модели, компьютерная модель описания гибких связей позволят проектанту МПС, имеющих в своём составе ГС, более качественно и оперативно проектировать практически все классы МПС.

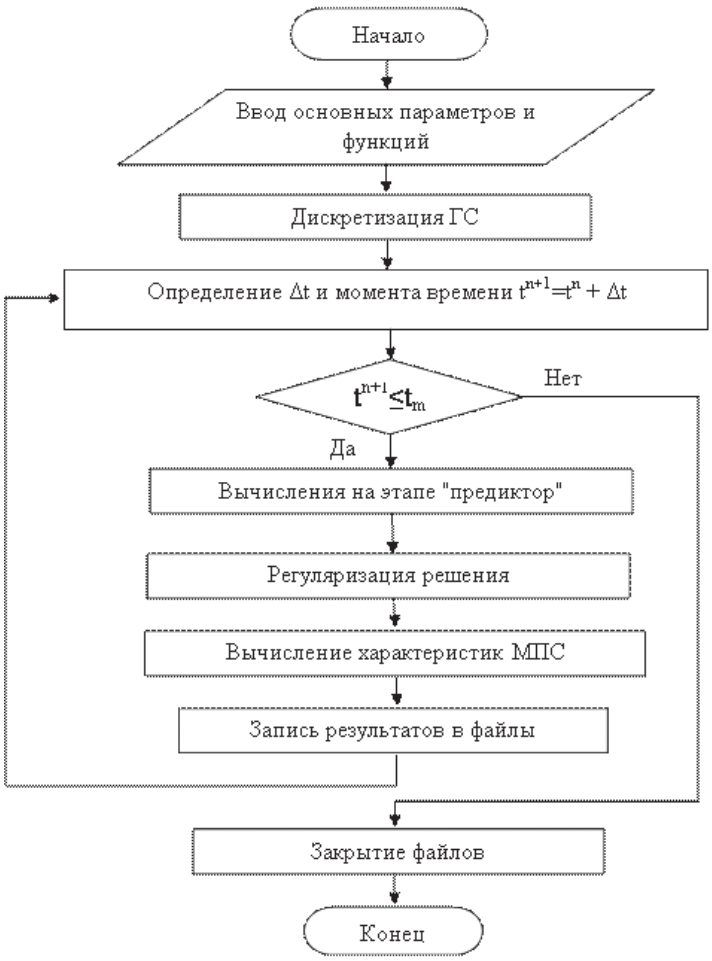


Рис. 3.19. Блок-схема алгоритма моделирования динамики МПС

Компьютерная модель на основе разработанной математической модели (определена система уравнений), описывающей динамику элемента ГС МПС в результате действия на него внешних сил и реакций растяжения, изгиба и поворота, и алгоритм моделирования динамики ГС МПС позволяют в конечном итоге упростить проектные расчёты МПС с ГС.

3.6. Компьютерная программа моделирования динамики ГС ПБС

В современном научном знании весьма широко распространена тенденция построения кибернетических моделей объектов самых различных классов [4, с. 168]. Под моделью в широком смысле понимается объект, замещающий другие объекты и способный давать о них информацию. Как отмечал В. М. Глушков, «существо всякой информационной модели состоит не в копировании объекта, а в описании его поведения» [267, с. 16]. Кибернетический этап в исследовании сложных систем ознаменован существенным преобразованием «языка науки», характеризуется возможностью выражения основных особенностей этих систем в терминах теорий информации и управления. Это сделало доступным их математический анализ. В литературе обсуждается вопрос о различных типах моделей [5, 10, 93, 337, 348]. Кибернетическая модель используется и как общее эвристическое средство, и как искусственный организм, и как система-заменитель, и в функции демонстрационной модели, проверяющей сходство общих принципов устройства модели и прототипа.

Несмотря на то, что первые численные методы появились ещё в глубокой древности, их широкое применение стало возможным только с развитием вычислительной техники. В свою очередь, использование компьютеров привело к совершенствованию существующих и созданию принципиально новых численных методов, обеспечивающих решение задач с достаточно малой погрешностью. Совершенствование численных методов позволило формулировать задачи детального исследования естественнонаучных и общественных проблем, постановка которых ранее была невозможна или не позволяла получить их решение другими методами [179].

Широкое использование ЭВМ в научных исследованиях теснейшим образом связано с появлением в структуре эксперимента качественно нового звена — экспериментирования с математическими моделями на машине [367, с. 65]. Благодаря ему в современном способе познания возникла существенно новая форма эксперимента — математический эксперимент. На вероятностно-статистической основе он синтезирует дедуктивный и индуктивный, экспериментальный аспекты математики и является обобщением метода эвристического использования ЭВМ в процессе научного познания, впервые предложенного фон Нейманом. По своей сути он аналогичен традиционному методу познания «гипотеза – дедукция – эксперимент», но только теперь реальный эксперимент заменяется вычислением поведения изучаемого объекта на ЭВМ. Сначала исследователь строит некоторую гипотезу относительно уравнений, описывающих данный объект, затем ищутся критические случаи поведения и для них на ЭВМ решаются уравнения, полученные результаты сравниваются с гипотетическими и формулируется новая гипотеза (последовательное планирование эксперимента). Этот цикл повторяется до тех пор, пока мы не получим приемлемого решения или не примем решения об окончании запланированных экспериментов.

Как считают В.С. Тюхтин и С.Н. Вовк [366], математический эксперимент представляет собой вероятностное обобщение процесса использования метода эксперимента Галилея, позволяющее эффективно создавать новый теоретический плацдарм для более глубокого раскрытия структуры и сущности объективного мира. Сущность этого плацдарма заключается в том, что на базе ЭВМ интенсифицируется развитие экспериментального аспекта математики, а результаты исследований представляются не одной, а множеством моделей.

В период появления кибернетики и ее бурного экстенсивного развития границы применимости кибернетических идей очерчивались определением Н. Винера [4, с. 178], что позволяло считать возможным их приложение к гораздо более широкому кругу явлений. Основная причина этой уверенности была связана с представлением об общности кибернетических принципов и понятий для любых сложноорганизованных систем. Считалось, что кибернетические средства познания могут с успехом применяться в самых различных областях науки, что утверждало представление об универсальности данных методов, порождавшее тенденцию использования кибернетических средств познания в социологии, философии, психологии, биологии, медицине и других науках [5, 21, 39, 59, 88], попытки решить с их помощью многообразные проблемы.

Анализируя кибернетическую модель с точки зрения того содержания, которое в ней представлено, как отмечет Н.Т. Абрамова [4, с. 173], что предметом абстрагирующей деятельности субъекта выступает некоторая логическая конструкция, в которой адекватное отображение получает заданная сторона исследуемой системы. Данный аспект адекватности отражения имеет совсем иное содержание, нежели адекватность отображения в неживой природе (см. гл. 3 [267]) или способность живых организмов к отражению определенной сферы реальности в зависимости от сферы их деятельности [3, с. 157–188]. Говоря о сути адекватности кибернетической модели, мы имеем в виду возможности кибернетической теории отображать некоторое многообразие свойств самоуправляемых систем. В той степени, в какой кибернетическая модель раскрывает содержание и механизмы «информационно-управленческих» процессов, можно говорить, что эта модель адекватно отражает анализируемый объект. Адекватность в данном случае выступает как определенное соотношение между знанием об объекте и той теорией, на основе которой это знание сформировалось. Как справедливо заметил И.В. Кузнецов, «никакая система знаний не является абсолютно адекватной объекту, она должна удовлетворять требованию адекватности в пределах своей применимости. Она должна изоморфно отражать ту группу взаимосвязей объектов, которая выявлена и зафиксирована» [4].

Проблема адекватности требует анализа специфики отношения между моделью, в которой зафиксировано некоторое знание об объекте, и теорией, лежащей в основании модели. Кибернетическая теория является не только определенным методом исследования, но и специфическим видением, отображающим внутренние слои частнонаучных форм знаний [336]. Данное видение и соответствующий логико-математический аппарат задают определенные свойства объекта. Все иные

стороны, присущие самоуправляемым системам, при этом не бывают «схвачены» этими идеями. Строя кибернетическую модель, исследователь абстрагируется от всех других аспектов сложной системы.

На чрезвычайную важность поисков путей исследования сложных систем методом наложения определенных упрощающих предположений указывает Р. Эшби [361]. «В прошлом, — отмечает он, — наблюдалось некоторое пренебрежение к упрощениям... Исследователи сложных систем должны заниматься упрощенными формами, ибо всеобъемлющие исследования бывают зачастую совершенно невозможны». При этом Эшби подчеркивает, что упрощенные модели должны быть в то же время «полными в себе»: хотя они дают только частичное знание (неполную истину), но это знание в границах своей применимости должно быть правильным [361, с. 83].

Абстрактные кибернетические структуры прилагают к исходным концептам частных наук таким образом, что обнаруживают гомоморфизм информационно-управленческих структур [361, с. 84]. Поскольку эти структуры присущи различным классам самоуправляемых систем, постольку описывающие эти феномены идеи в одинаковой степени справедливы для достаточно широкого круга явлений. К их числу относятся, например, принцип кодирования и механизма обработки информации, принцип обратной связи, принцип иерархичности и целеполагания и др.

Из анализа приложения кибернетики к задачам различных классов вытекает, что определенный круг теоретических идей формирует определенное видение объекта исследования [4, с. 174]. Объект познания и его результат детерминированы некоторой общей теорией, из которой частная дисциплина при построении модели черпает общие понятия и методы исследования. Задача частной дисциплины состоит в том, чтобы, сохраняя точный смысл общих понятий, показать их специфическое, нетривиальное содержание в своей собственной области.

Н. Т. Абрамова [4] обращает внимание на следующую особенность кибернетического моделирования: исходные концепты (кибернетические законы, принципы и пр.) предопределяют принципиальные черты конечного результата исследования. Задачи управления и связи, решаемые для объектов самых различных областей, относятся к одному и тому же классу. Однако, в пределах этого класса выводы могут иметь новое содержание.

Специфический статус кибернетических идей обсуждается многими видными учеными [4, с. 179]. Фундаментальная роль в современной науке, результативность применения кибернетических идей не связывается обычно с открытием каких-то новых экспериментальных данных. Скорее они несут эвристическую функцию, их значимость видится в методологической роли в познании. Существенным в этом случае будет не столько приложение этих средств познания к конкретным областям, сколько порождение на их основе ряда новых идей.

Строя кибернетическую модель, как отмечает Н. Т. Абрамова [4, с. 179], специалист конкретных наук связывает себя с определенным кругом теоретических представлений. В результате происходит известное переосмысление исходных концептов, представлений, законов. При этом не только имеет место модификация,

спецификация данных конкретных областей знания, но и идеи кибернетики также подвергаются изменениям в зависимости от специфики предмета исследования.

С помощью кибернетической модели исследователь ставит своей целью раскрыть, уточнить определенную задачу. Так, известный вклад идей теории информации в разработку проблем эволюции позволил подразделить элементарный цикл эволюционных преобразований на отдельные звенья, выделить факторы, ответственные за преобразования, и внести методы количественной оценки изучаемых явлений [4, с. 141].

Из того, что кибернетическая модель позволяет уточнить, углубить ряд положений в биологии, физиологии, эволюционной теории и других областях, может ли быть сделан дальнейший вывод о том, что эти модели являются теорией данных явлений? Существуют прямо противоположные ответы. Так, можно встретить утверждения, что кибернетическая модель является теорией моделируемой области, что, например, фундаментом теоретической генетики является теоретическая кибернетика [355, с. 44].

Тем самым система кибернетических понятий, используемая для изучения объектов различных классов, рассматривается как их теория. А. А. Олицкий [355, с. 45], подчеркивая ограниченные возможности кибернетического подхода, всё же приходит к тому, что формально-кибернетическое знание может с известным ограничением быть рассмотрено как теория или какой-то её эквивалент. Путь по созданию теории, по его мнению, может идти через создание ряда идеальных моделей, которые, не обладая всеми признаками развитой теории, тем не менее являются элементами теоретического знания.

Подчеркивая специфический характер кибернетической модели, Н. Т. Абрамова [4, с. 181] обращает внимание на существование других теоретических интерпретаций одного и того же объекта познания, в которых отражены другие аспекты и стороны. Таким образом, подлинное объяснение не всегда связано с каким-то одним классом теоретических идей, знание может носить многоступенчатый характер. Подводя итоги рассмотрения вопроса о возможности теоретических построений на основе кибернетики, она утверждает, что кибернетические модели являются особой формой теоретического описания, раскрывающей системы связи и управления [4, с. 182]. Будучи одним из шагов на пути ассимиляции знания в различных областях, эта форма теоретического описания включает в себя обоснование лишь одного «среза» действительности. Поскольку объясненным оказывается лишь этот срез сложной организации объекта, но не вся его целостность, постольку полученную модель можно рассматривать как начальную стадию процесса построения интегральной теории. Тем не менее эта форма теоретического описания также имеет самостоятельное значение.

Анализируя процесс приложения кибернетических моделей в различных областях знания, можно заметить расширение сферы их применения, т. е. экстенсивное развитие. Подтверждением этому служит широкое использование кибернетического моделирования в науках о мозге, в социологии, в искусстве и в ряде технических наук [4]. В частности, в современной измерительной технике наш-

ли приложение информационные модели. Возникшая на их основе информационная теория измерения и измерительных устройств — это новый раздел современной прикладной метрологии. По мнению видных специалистов, на базе информационно-энергетического подхода к вопросам теории измерительных устройств получают хотя еще далеко не полную, но в значительной степени законченную систему взглядов, положений, оценок. Эта система не противоречит прежним, классическим представлениям, а является их логическим развитием, позволяющим с помощью новых идей преодолеть ограниченность некоторых старых оценок, существенно их дополняя [4].

Таким образом, кибернетический подход — это, скорее, такая стратегия исследования, которая связана с выявлением некоторых обобщенных, инвариантных форм, с проводящейся при этом формализацией и математизацией знания [4]. Кибернетическая модель способствует разработке более развитой теории, элементом содержания которой она становится вместе со специфическими законами той или иной предметной области.

Алгоритм, записанный в форме, воспринимаемой вычислительной машиной, представляет собой программную модель [187].

Описание интерфейса программы моделирования движения МПС.

Компьютерная программа моделирования динамики МПС разработана в системе Delphi, на основе алгоритма решения системы уравнений математической модели динамики МПС [448]. Работа программы начинается после активизации файла FILUM_CIRKUL.EXE. В результате этого на экране компьютера появляется рабочее окно программы (рис. 3.20) [434].

Рабочее окно программы содержит окна для задания величин 38 параметров МПС и 3 параметров алгоритма. Справа от этих окон кратко записано название параметров и их размерности.

Результаты моделирования представляются графически на четырёх диаграммах в заданные моменты времени, которые показываются в окне рядом с диаграммами. Эти моменты определяются интервалом времени, через который происходит смена изображений на диаграммах, и задаются параметром «шаг визуализации, с». Три диаграммы показывают пространственное расположение СН, ГС и ПА в проекциях на плоскости X0Z, Y0Z и X0Y прямоугольной декартовой системы координат, а четвёртая диаграмма показывает распределение силы растяжения ГС вдоль её длины. Числовые результаты выводятся в текстовое окно с полосами прокрутки данных в нём для их просмотра после выполнения программы. В заданные моменты времени происходит запись обобщённых координат узлов ГС, СН и ПА, а также сил растяжения ГС в узлах её элементов в файловой системе компьютера. Эти файлы становятся доступны для анализа данных после завершения работы программы. После записи величин параметров МПС и окружающей среды производится их ввод в программу. Для этого необходимо нажать на кнопку рабочего окна программы с названием «Ввод данных» щелчком левой клавиши мыши. После этого на диаграммах и в текстовом окне появляются изображения и данные, соответствующие введённым параметрам МПС (рис. 3.21) [393].

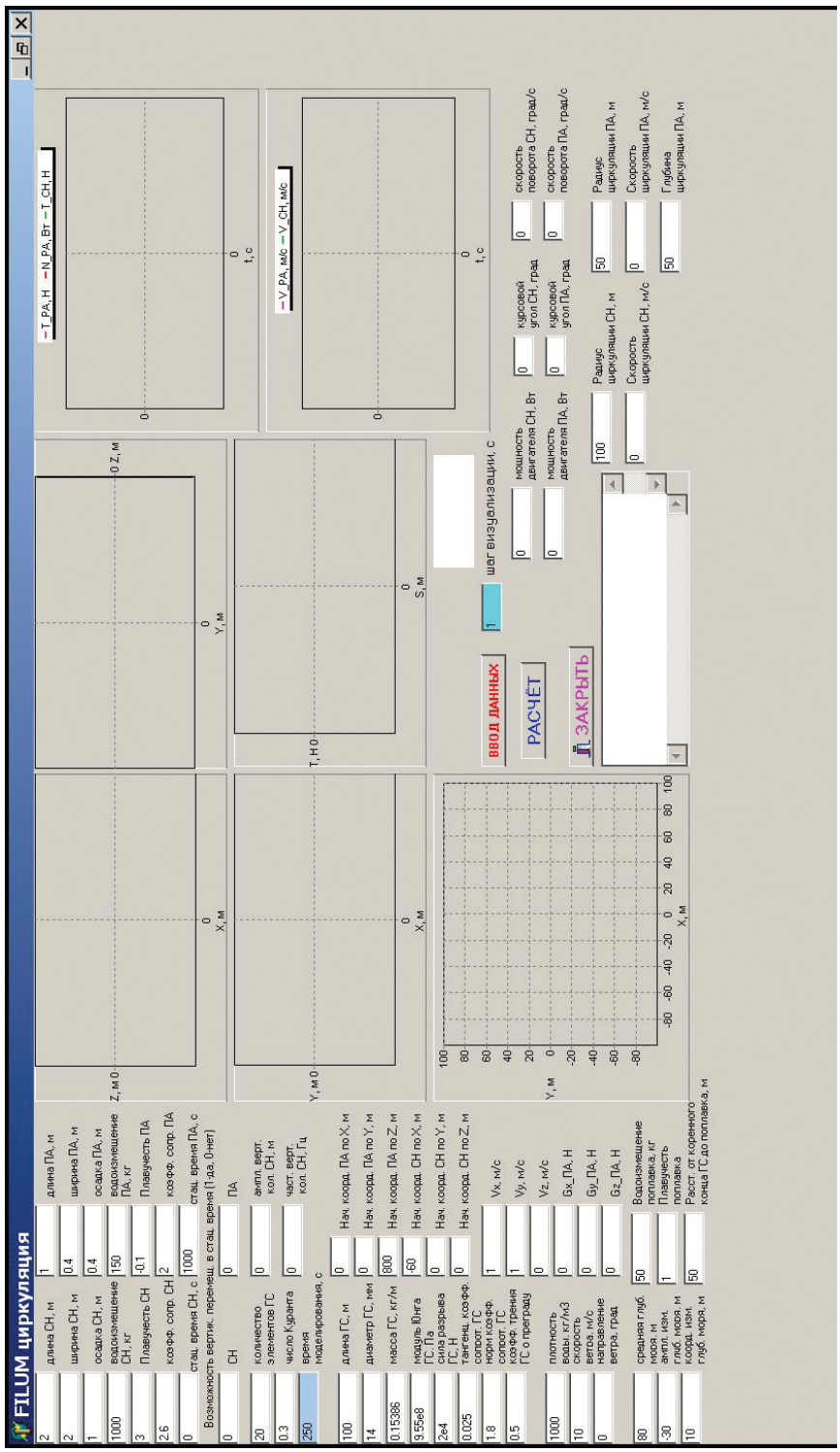


Рис. 3.20. Начальный вид рабочего окна программы моделирования динамики МПС

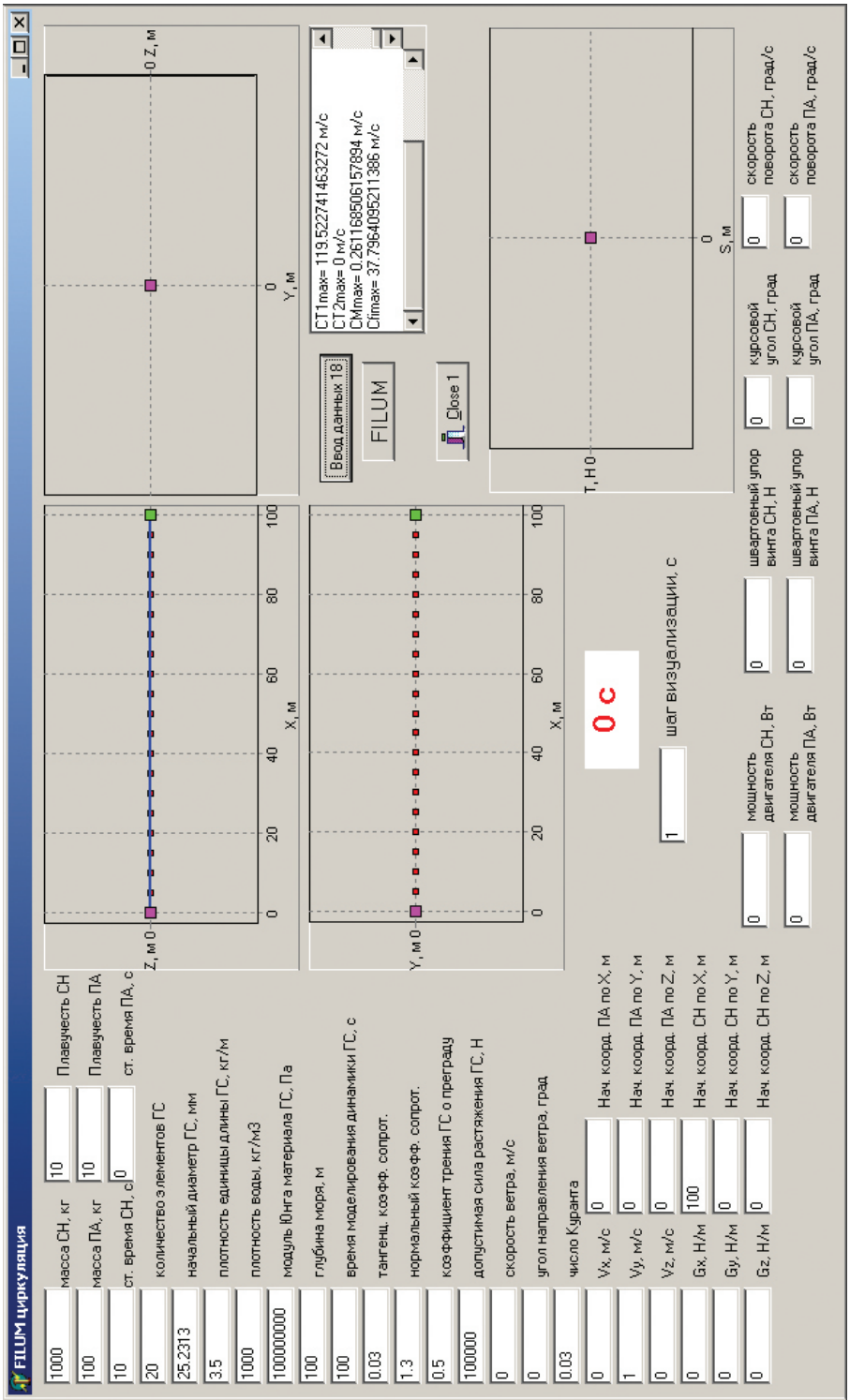


Рис. 3.21. Вид рабочего окна программы моделирования динамики МПС после ввода исходных данных

Пользователь программы может проверить эти данные и, если заметит неточности, то может откорректировать введённые параметры, после чего повторить их ввод.

Рабочее окно программы содержит окна для задания величин 58 параметров МПС и 4 параметров алгоритма. Справа от этих окон кратко записано название параметров и их размерности.

К числу параметров алгоритма относятся:

– количество элементов ГС;

– число Куранта;

– время моделирования динамики МПС, с;

– шаг визуализации, с.

Количество элементов ГС определяет погрешность моделирования и затраты времени на выполнение расчётов. Чем больше элементов ГС, тем меньше погрешность расчёта, но тем больше его длительность. В программе можно задавать не более 100 элементов ГС. Ориентировочно, длина одного элемента не должна превышать 20 м. Окончательный выбор количества элементов ГС можно выполнить в результате сравнения решений задачи, полученных с разным количеством элементов ГС.

Число Куранта определяет устойчивость алгоритма к погрешностям, появляющимся в результате аппроксимации ГС конечным числом элементов. Оно не должно быть больше 1. Чем больше нормальный и тангенциальный коэффициенты сопротивления ГС, тем меньше должно быть число Куранта и длительнее будет расчёт. Поэтому число Куранта должно быть как можно больше, при условии обеспечения устойчивости вычислений.

Время моделирования динамики МПС выбирают в зависимости от длительности переходного процесса в МПС.

Шаг визуализации результатов моделирования определяет частоту обновления диаграмм в рабочем окне программы и записи результатов в файлы на жёстком диске компьютера.

Две группы, по восемь параметров в каждой, определяют характеристики СН и ПА. К ним относятся:

– длина СН (ПА), м;

– ширина СН (ПА), м;

– осадка СН (ПА), м;

– водоизмещение СН (ПА), кг;

– плавучесть СН (ПА);

– коэффициент сопротивления СН (ПА);

– стационарное время СН (ПА), с;

– возможность вертикального перемещения СН (ПА) в стационарное время (1 — да, 0 — нет).

Предпоследний параметр определяет время от начала моделирования динамики МПС, в течение которого СН или ПА остаются неподвижными в плоскости моря, а последний параметр определяет возможность вертикального перемещения СН (ПА) в течение заданного стационарного времени (1 — да, 0 — нет).

Следующие 8 параметров характеризуют свойства ГС. К ним относятся:

– начальная длина ГС, м;

– начальный диаметр ГС, м;

– плотность единицы длины ГС, кг/м;

– модуль Юнга материала ГС, Па;

– допустимая сила растяжения ГС, Н;

– тангенциальный коэффициент гидродинамического сопротивления ГС;

– нормальный коэффициент гидродинамического сопротивления ГС;

– коэффициент трения ГС о преграду.

Если в процессе моделирования динамики МПС сила растяжения ГС превышает допустимое значение, тогда программа завершает работу и помещает на рабочем окне сообщение «Разрыв ГС!!!» с указанием момента времени, при котором разрыв ГС произошёл.

Вода моря считается несжимаемой и характеризуется плотностью, кг/м^3.

Характеристики установившегося волнения на поверхности моря определяются двумя параметрами:

– скорость ветра, м/с;

– угол направления ветра, град.

Однородное по объёму акватории морское течение характеризуется тремя проекциями его скорости на оси координат:

– V_x, м/с;

– V_y, м/с;

– V_z, м/с.

Рельеф дна акватории характеризуется тремя параметрами:

– средняя глубина моря, м;

– амплитуда изменения глубины моря, м;

– координата (по оси X) изменения глубины моря, м.

При задании этих параметров необходимо учитывать, что вертикальная ось координат (ось Z) направлена к центру Земли, поэтому средняя глубина моря всегда положительна. Глубина моря изменяется ступенчато, на величину заданной амплитуды, постоянной вдоль линии, параллельной оси Y, положение которой в направлении оси X определяется координатой изменения глубины моря. Если глубина моря уменьшается, то амплитуда отрицательная, иначе — она положительная.

Начальные координаты ГС определяются тремя координатами СН и ПА:

– начальная координата СН по X, м;

– начальная координата СН по Y, м;

– начальная координата СН по Z, м;

– начальная координата ПА по X, м;

– начальная координата ПА по Y, м;

– начальная координата ПА по Z, м.

В начальный момент времени ГС имеет форму прямой нерастянутой линии (сила натяжения равна нулю), соединяющей точки с координатами СН и ПА. Если начальная длина ГС больше, чем расстояние между СН и ПА, тогда алгоритм программы

автоматически изменяет координаты положения ПА в плоскости XOY, не изменяя при этом заданную координату его положения по Z, а затем, до начала моделирования динамики МПС, перемещает ПА в первоначально заданную точку. При этом, если заданная координата ПА по оси Z больше, чем минимальная глубина моря, тогда координата ПА по оси Z задаётся равной минимальной глубине моря.

В программе предусмотрено задание дополнительной, постоянной по времени силы, действующей на ПА (например, создаваемой «отводителями» и т. п.), которая определяется тремя её проекциями на оси координат:

– Gx_ПА, Н;

– Gy_ПА, Н;

– Gz_ПА, Н.

Предусмотрено размещение на ГС дополнительного поплавка (или груза, если его плавучесть меньше нуля), что определяется тремя параметрами:

– водоизмещение поплавка, кг;

– плавучесть поплавка;

– расстояние от коренного конца ГС (от СН) до поплавка, м. Поплавок отсутствует, если его водоизмещение равно нулю.

Программа предусматривает возможность исследования амплитудно-частотных характеристик МПС. Для этого необходимо задать два параметра:

– амплитуда вертикальных колебаний СН, м;

– частота вертикальных колебаний СН, Гц.

В этом случае можно исследовать амплитудно-частотные характеристики перемещения ПА, скорости его движения, сил натяжения ГС. Эти исследования можно выполнять как при отсутствии других внешних воздействий на МПС, так и при их наличии.

В программе предусмотрена возможность моделирования динамики МПС при наличии у СН или ПА энергетических установок с помощью шести параметров:

– мощность двигателя СН, Вт;

– курсовой угол СН, град;

– скорость поворота СН, град/с;

– мощность двигателя ПА, Вт;

– курсовой угол ПА, град;

– скорость поворота ПА, град/с.

В программе учтено, что 50% мощности двигателя используется для сообщения движения СН или ПА (по статистическим данным, от 45 до 55%). Курсовые углы СН и ПА отсчитываются от меридиана Земли в направлении часовой стрелки (направление оси X совпадает с направлением меридиана). Скорость поворота СН и ПА положительна в направлении часовой стрелки.

Программа позволяет определять характеристики МПС, когда СН или ПА совершают циркуляцию по окружности заданного радиуса и с заданной скоростью [30]. Для этого необходимо задать следующие параметры:

– радиус циркуляции СН, м;

– скорость циркуляции СН, м/с;

– радиус циркуляции ПА, м;
– скорость циркуляции ПА, м/с;
– глубина циркуляции ПА, м.

Если скорость циркуляции СН или ПА равна нулю, тогда циркуляция СН или ПА не происходит, иначе она осуществляется при блокировании всех остальных режимов движения СН или ПА. Если скорость циркуляции СН или ПА положительна, тогда СН или ПА циркулируют по часовой стрелке, иначе — в противоположном направлении. Глубина циркуляции ПА может не совпадать с заданной глубиной его положения в начале моделирования, тогда программа включает процедуру плавного перехода ПА в процессе его циркуляции на глубину циркуляции. Если глубина циркуляции ГС больше заданной глубины моря, тогда программа увеличивает глубину моря.

Результаты моделирования представляются графически на семи диаграммах в заданные моменты времени, которые показываются в окне рядом с диаграммами. Эти моменты определяются интервалом времени, через который происходит смена изображений на диаграммах, и задаются параметром «шаг визуализации, с». Три диаграммы показывают пространственное расположение СН, ГС и ПА в проекциях на плоскости X0Z, Y0Z и X0Y прямоугольной декартовой системы координат, а четвёртая диаграмма показывает распределение силы растяжения ГС вдоль её длины (координата S). На первых трёх диаграммах диапазон координат непрерывно меняется, адаптируясь к расположению МПС в текущий момент времени, поэтому для большей наглядности на пятой диаграмме координаты X и Y изменяются только в пределах ±100 м. На шестой диаграмме располагаются данные об изменении во времени сил натяжения ГС, действующих на ПА и СН. Если включен режим циркуляции ПА (скорость его циркуляции не равна нулю), тогда на диаграмме показывается изменение мощности движителя ПА. По этой мощности, зная пропульсивный КПД валопровода и движителя ПА, можно определить необходимую мощность двигателя ПА, обеспечивающую заданный режим его циркуляции. На седьмой диаграмме демонстрируется изменение скорости СН и ПА в процессе их движения.

Числовые результаты выводятся в текстовое окно с полосами прокрутки данных в нём для их просмотра после выполнения программы (рис. 3.22).

В заданные моменты времени (с заданным шагом визуализации) происходит запись обобщённых координат узлов ГС, СН и ПА, а также сил растяжения ГС в узлах её элементов в файловой системе компьютера. Эти файлы становятся доступны для анализа данных после завершения работы программы).

Программа вводит заданные параметры МПС после щелчка левой клавиши мыши по кнопке «ВВОД ДАННЫХ», а также демонстрирует введённые данные на диаграммах и в текстовом окне с полосами прокрутки для проверки точности их ввода. Выполнение программы начинается после щелчка по кнопке «РАСЧЁТ». После ввода данных или окончания расчёта работу программы можно завершить щелчком по кнопке «ЗАКРЫТЬ». Во время выполнения программы кнопка «ЗАКРЫТЬ» не активна.

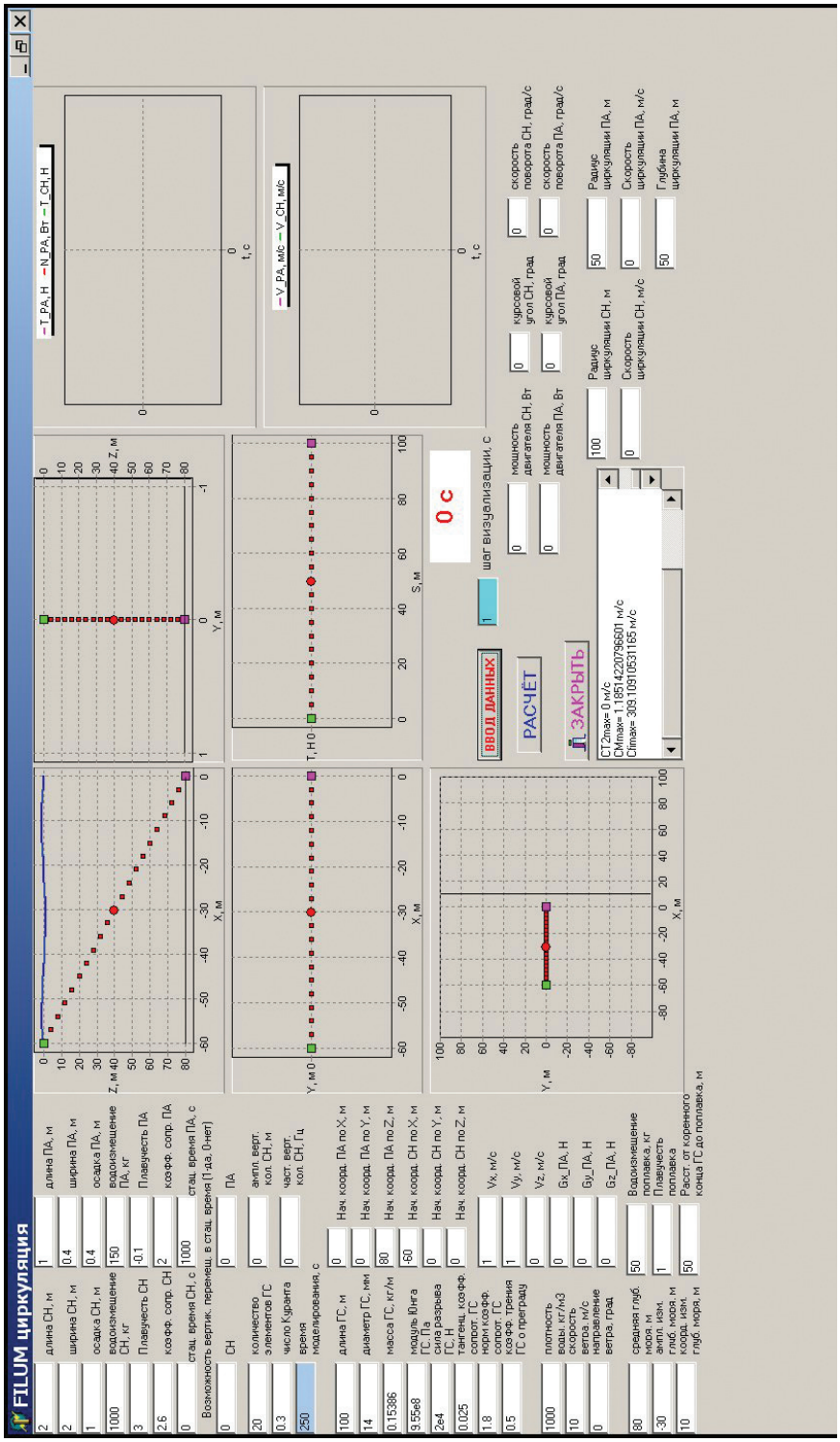


Рис. 3.22. Вид рабочего окна программы моделирования динамики МПС после ввода исходных данных

В процессе выполнения программы пользователь может наблюдать на диаграммах её рабочего окна изменение положения узлов элементов ГС, на концах которой большими маркерами показаны координаты СН (зелёный маркер) и ПА (лиловый маркер), а также изменение сил растяжения ГС в узлах её элементов (рис. 3.23).

Это позволяет оперативно определять правильность выбора параметров МПС при заданных режимах движения СН и ПА в условиях морских течений, волнения поверхности моря (синяя линия на диаграммах) и взаимодействия элементов МПС с морским дном. Если сила растяжения ГС достигнет или превысит заданную допустимую силу её растяжения, тогда программа прекращает работу, на рабочем окне появляется запись «Разрыв ГС!!!», а на диаграмме, показывающей силы растяжения ГС, можно определить, в каком её узле произошёл разрыв (при других параметрах МПС) (рис. 3.24).

Это позволяет оперативно определять правильность выбора параметров МПС при заданных режимах движения СН и ПА в условиях морских течений, волнения поверхности моря (синяя линия на диаграммах) и взаимодействия элементов МПС с морским дном. Если сила растяжения ГС достигнет или превысит заданную допустимую силу её растяжения, тогда программа прекращает работу, на рабочем окне появляется запись «Разрыв ГС!!!», а на диаграмме, показывающей силы растяжения ГС, можно определить, в каком её узле произошёл разрыв [434].

3.7. Тестирование компьютерной программы моделирования динамики гибких связей подводных буксируемых систем

Иногда происходят споры о том, какой из терминов лучше использовать: верификация или тестирование? Верификация представляет собой формальное доказательство на абстрактной математической модели системы, в предположении о том, что соответствие между математической моделью и природой системы считается изначально заданным. Например — построение модели либо математического анализа и доказательств правильности алгоритмов и программ.

Верификация [фр. verification, с лат. verus — истинный + facere — делать] — проверка истинности теоретических положений, установление достоверности опытным путём [207].

Существует и другое понятие верификации: верификация — способ проверки гипотезы на истинность [205, 208].

Так, в Приложении к [188, с. 285] рассматриваются виды верификации, говорится о верификации прогноза путем его разработки методом, отличным от первоначально использованного, либо верификации прогноза путем его сопоставления с прогнозами, полученными из других источников информации.

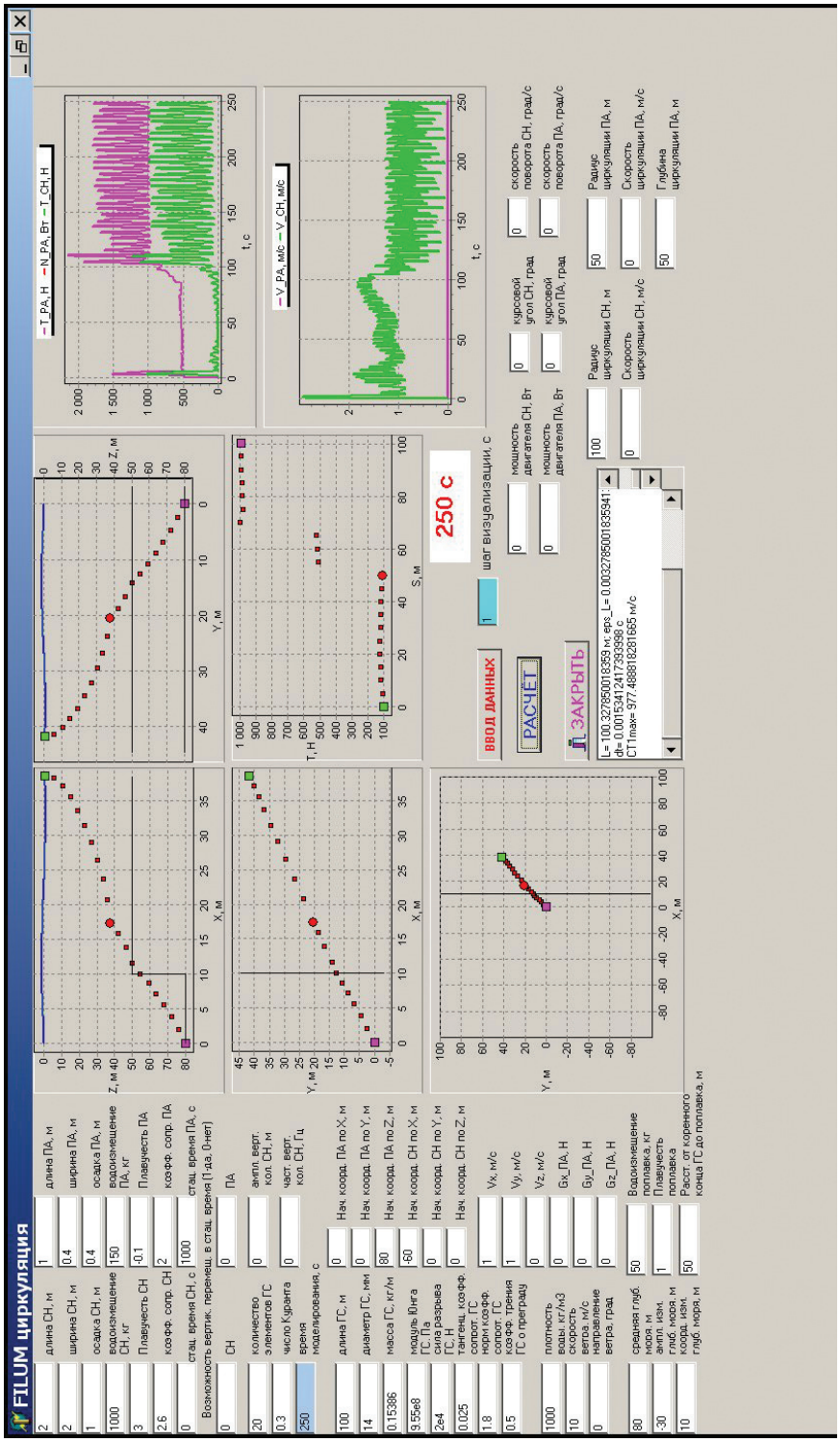


Рис. 3.23. Вид рабочего окна программы моделирования динамики МПС после завершения её выполнения

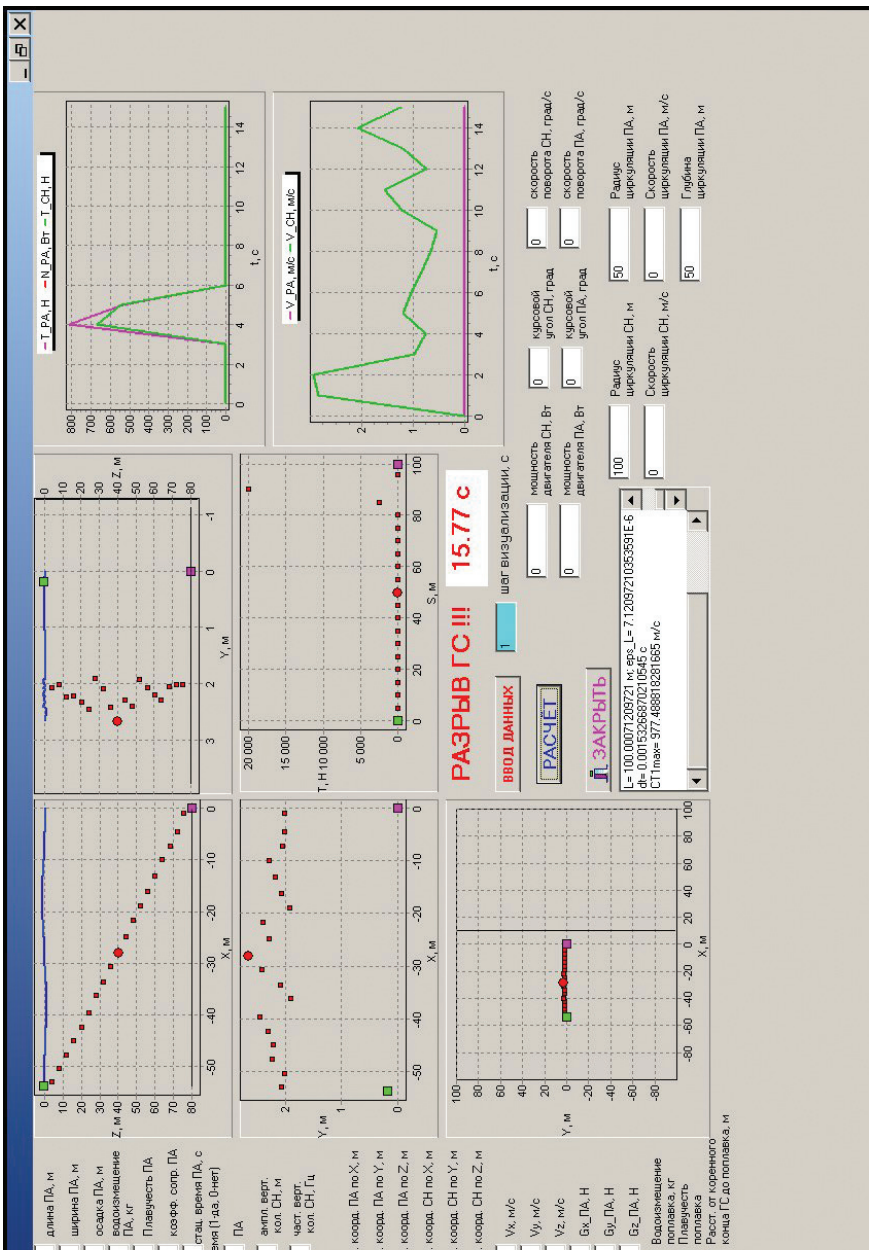


Рис. 3.24. Вид рабочего окна программы моделирования динамики МПС после завершения её выполнения раньше заданного времени в результате разрыва ГС

Из-за рутинности даже простой формальной верификации и теоретической возможности их полной автоматизации под формальной верификацией обычно подразумевают автоматическую верификацию с помощью программы [449]. Из существующих подходов к формальной верификации выделим следующие:

– проверка моделей;

– систематический анализ алгоритмов и программ.

При этом алгоритм содержит ошибки, если он дает неправильные результаты либо не дает результатов вообще для некоторых допустимых исходных данных.

Как отмечается в [449], тестирование программного обеспечения не может доказать, что система, алгоритм или программа не содержит никаких ошибок и дефектов и удовлетворяет определённому свойству. Это может сделать формальная верификация, которая может использоваться для проверки таких систем, как программное обеспечение, представленное в виде исходных текстов, криптографические протоколы, комбинаторные логические схемы, цифровые схемы с внутренней памятью.

Примерами математических объектов, часто используемых для моделирования и формальной верификации программ и систем, являются: структурированные алгоритмы и структурированные программы.

Практическая проверка позволяет также решать, находятся ли в требуемых границах точности ошибки измерения, входящие в предпосылки, и приемлемы ли в данном конкретном случае сделанные предположения [351, с. 200]. Точность результата как раз и зависит главным образом от того, насколько точно с помощью сделанных предположений может быть отражена моделируемая реальность. Кроме того, как считает З. Пауль [351], может оказаться, что первоначальное математическое отображение описывает отражаемое явление хотя и адекватно (правда, односторонне адекватно, потому что фиксируется только то, что поддается математическому отображению), однако с помощью этих формально логических или (и) математических операций из математического отображения могут быть сделаны выводы, не поддающиеся интерпретации в отношении данной предметной области. В таком случае следует подумать, как можно ограничить применение соответствующих операций таким образом, чтобы из первоначального математического отображения могли быть выведены только поддающиеся интерпретации следствия. Эти выводы на первых порах представляют собой потенциально новое знание. И лишь последующие исследования показывают, что они не верифицируемы и, следовательно, не имеют реального смысла.

Эти модели-гипотезы, или модели непрямой аналогии, затем проверяются и уточняются в серии экспериментов, пока мы не приходим к формулированию общего закона [366, с. 74]. Как отмечают В.С. Тюхтин и С.Н. Вовк [366, с. 75], исторически преходящий относительный характер практики, любого эксперимента состоит в том, что экспериментальные данные не могут полностью, абсолютно точно и глубоко доказать адекватность той или иной модели, гипотезы. Принятие какой-то определенной модели на основе тех или иных экспериментов не отменяет того, что результаты данных наблюдений в принципе могут не противоречить

и множеству других возможных моделей. Отсюда вытекает, что приближение к наиболее правдоподобной, «более истинной» модели может быть достигнуто путем выбора, или предпочтения, одной из нескольких конкурирующих моделей. Эта задача влечет постановку и планирование так называемых дискриминирующих экспериментов [153, гл. 7]. При этом результаты измерений, естественно, не должны быть инвариантны относительно замены одной из конкурирующих моделей другой. Выбор предпочтительной модели в результате дискриминирующих экспериментов осуществляется с помощью тех или иных критериев.

Как отмечает В. Казиев из Кабардино-Балкарского государственного университета [450], тестирование алгоритма — это проверка правильности или неправильности работы алгоритма на специально заданных тестах или тестовых примерах — задачах с известными входными данными и результатами (иногда достаточны их приближения). Тестовый набор должен быть минимальным и полным, то есть обеспечивающим проверку каждого отдельного типа наборов входных данных, особенно исключительных случаев.

Тестирование алгоритма не может дать полной (100%-ной) гарантии правильности алгоритма для всех возможных наборов входных данных, особенно для достаточно сложных алгоритмов.

Полную гарантию правильности алгоритма может дать описание работы и результатов алгоритма с помощью системы аксиом и правил вывода или верификация алгоритма. Для несложных алгоритмов грамотный подбор тестов и полное тестирование может дать полную картину работоспособности (неработоспособности).

Таким образом, целью тестирования является проверка работоспособности созданных алгоритма и компьютерной программы моделирования динамики ГС, позволяющих выполнять расчёты динамики ГС МПС с целью совершенствования процесса проектирования МПС с ГС.

При задании величин и получении решения задачи, как отмечает В.М. Косенков [179], возникает погрешность, определяемая отличием математической модели от моделируемого объекта, которую необходимо учитывать в процессе решения и при анализе результата. При вычислениях с помощью компьютерных программ погрешность округления обычно пренебрежимо мала.

Тестирование программ — это процесс проверки программ на ЭВМ с помощью тестов [451]. Тесты — это наборы тестовых исходных данных с перечнем правильных результатов. Набор тестов — структурно полный, если на этом наборе тестов выполняется каждая альтернатива, каждая последовательность и каждый цикл один или несколько раз.

Тестирование не может гарантировать отсутствие ошибок в программах. Гарантии отсутствия ошибок может дать только исчерпывающий анализ правильности алгоритмов и программ. Анализ и доказательства правильности алгоритмов и программ можно и нужно проводить после структурно полного тестирования программ на ЭВМ.

Таким образом спор о правомерности использования термина «верификация» или «тестирование» компьютерных программ показывает, что в данном случае

более целесообразно применение термина «тестирование», т.к. термин «верификация» более применим в случае подтверждения истинности экспериментальных данных.

При тестировании программ на ЭВМ основные этапы решения задач на ЭВМ следующие [452]:

1. Постановка задачи.
2. Определение методов решения.
3. Составление алгоритмов.
4. Написание программ для ЭВМ.
5. Отладка программ на ЭВМ.
6. Получение результатов на ЭВМ.

Постановка задач — точное и четкое определение требуемых результатов и исходных условий в задачах. Результаты — правильные, если они отвечают требованиям поставленных задач, и результаты неправильные, если они противоречат поставленным требованиям.

Для отладки программы нужно проверить ее работоспособность на каких-то входных данных [450], эти входные данные должны быть каким-то образом подобраны. Затем, после выполнения программы на этих входных данных, нужно сравнить полученный результат с тем, который должен получиться, если программа работает правильно. Этот процесс и называется тестированием. Если полученный результат отличается от эталонного, то тест считается удачным, потому что он помог обнаружить ошибку. А если полученный ответ совпал с правильным — радоваться рано. Один тест не может полностью проверить всю программу, ошибка вполне могла затаиться в той части, которая осталась невыполненной. Для того чтобы протестировать всю программу, проверить все возможные частные случаи, составляют не один тест, а набор тестов.

В план тестирования обычно входят следующие этапы [435]:

1. Сравнение программы со схемой алгоритма.

2. Визуальный контроль программы на экране дисплея или визуальное изучение распечатки программы и сравнение ее с оригиналом на программном бланке. Первые два этапа тестирования способны устранить большее количество ошибок, как синтаксических (что не так важно), так и семантических (что очень важно, так как позволяет исключить их трудоемкий поиск в процессе дальнейшей отладки).

3. Трансляция программы на машинный язык. На этом этапе выявляются синтаксические ошибки. Компиляторы с языков Си, Паскаль выдают диагностическое сообщение о синтаксических ошибках в листинге программы (листингом называется выходной документ транслятора, сопровождающий оттранслированную программу на машинном языке — объектный модуль).

4. Редактирование внешних связей и компоновка программы. На этапе редактирования внешних связей программных модулей программа-редактор внешних связей, или компоновщик задач, обнаруживает такие синтаксические ошибки, как несоответствие числа параметров в описании подпрограммы и обращении к ней, вызов несуществующей стандартной программы.

5. Выполнение программы. После устранения обнаруженных транслятором и редактором внешних связей (компоновщиком задач) синтаксических ошибок переходят к следующему этапу — выполнению программы на ЭВМ на машинном языке: программа загружается в оперативную память, в соответствие с программой вводятся исходные данные и начинается счет. Проявление ошибки в процессе ввода исходных данных или в процессе счета приводит к прерыванию счета и выдаче диагностического сообщения рабочей программы. Проявление ошибки дает повод для выполнения отладочных действий; отсутствие же сообщений об ошибках не означает их отсутствия в программе. План тестирования включает при этом проверку правильности полученных результатов для каких-либо допустимых значений исходных данных.

6. Тестирование программы. Если программа выполняется успешно, желательно завершить ее испытания тестированием при задании исходных данных, принимающих предельные для программы значения, а также выходящие за допустимые пределы значения на входе.

Контрольные примеры (тесты) — это специально подобранные задачи, результаты которых заранее известны или могут быть определены без существенных затрат.

Рассмотрим результаты тестирования математической модели и алгоритма динамики ГС [435]. Тестирование математической модели привязной системы и алгоритма расчёта выполнено на примерах стационарного режима буксировки трёх видов привязных систем. Разработанная математическая модель предназначена, прежде всего, для решения нестационарных задач динамики привязных систем. Поэтому стационарные режимы буксировки определены в результате завершения математического моделирования нестационарного (переходного) процесса системы от начального положения (ГС подвешена на СН вертикально в направлении оси Z) до её установившегося состояния. Для упрощения моделирования установившегося состояния привязной системы использовали принцип «обращения воздействия», когда элементы системы считали неподвижными, а на них набегает поток воды со скоростью, равной скорости движения СН и противоположной по направлению. Рассмотрим примеры проверки математической модели [394].

Привязная система 1. На примере расчёта из книги Бугаенко Б. А. [16, с. 144–146]. Судно-буксировщик (СБ) соединено с буксируемым носителем (БН) кабель-буксиром диаметром 30 мм, длиной 400 м, жёсткость кабель-буксира — $6{,}75 \cdot 10^7$ Н, погонная масса — 1,43 кг/м. Схема буксировки показана на рис. 3.25.

К БН присоединён стабилизирующий участок дополнительного каната нулевой плавучести, создающий при скорости буксировки 3 м/с усилие ($F_{БН}$) 1 кН. БН представляет собой круговой цилиндр диаметром 0,8 м, длиной 2 м, массой 1030,44 кг, при которой обеспечивается его нулевая плавучесть. Коэффициенты сопротивления БН $C_x = C_z = 0{,}77$, кабель-буксира $C_n = 1{,}35$, $C_\tau = 0{,}04$.

На рис. 3.26 показана линия кабель-буксира, рассчитанная в работе [16] без учёта гидродинамического сопротивления кабель-буксира (лиловая линия), а также линии, рассчитанные по разработанной модели без учёта гидродинамического сопротивления кабель-буксира (синяя линия) и с его учётом (красная линия).

На рис. 3.27 показано распределение силы натяжения вдоль кабель-буксира в направлении координаты S (обозначения на рис. 3.27 аналогичны обозначениям на рис. 3.26).

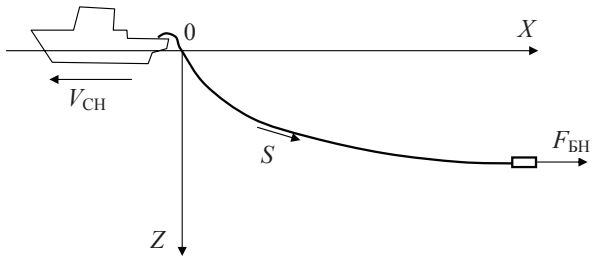


Рис. 3.25. Схема буксировки для привязной системы 1

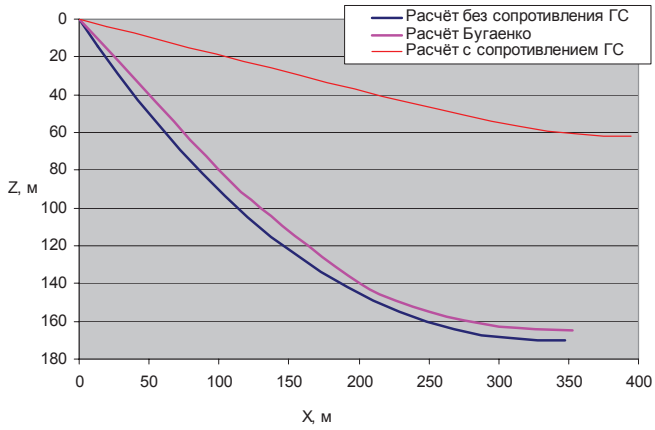


Рис. 3.26. Линия кабель-буксира, рассчитанная в работе [16] без учёта гидродинамического сопротивления кабель-буксира

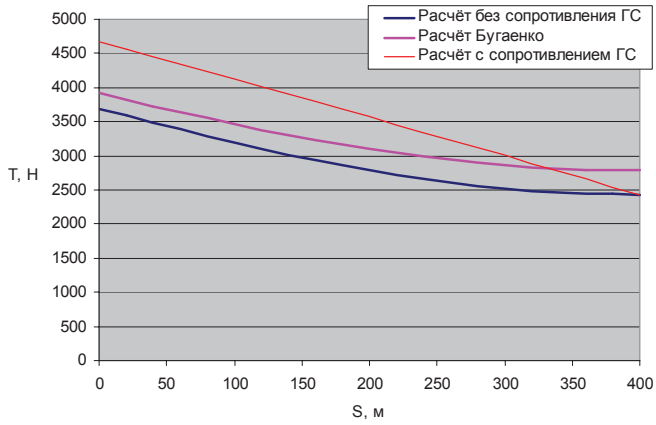


Рис. 3.27. Распределение силы натяжения вдоль кабель-буксира в направлении координаты *S*

Из рисунков 3.26 и 3.27 следует, что результаты моделирования согласуются с расчётами, приведёнными в [16] без учёта гидродинамического сопротивления кабель-буксира. Учёт сопротивления кабель-буксира при математическом моделировании приводит к уменьшению глубины его погружения, что соответствует физическим законам.

Привязная система 2. На примере расчёта из статьи С.Н. Нужного [293, с. 101–103]. Схема буксировки показана на рис. 3.28.

В отличие от схемы буксировки, показанной на рис. 3.25, в [293] использован БН с собственным движителем, упор которого принимал значения 50, 100, 150 и 250 Н в направлении движения СБ со скоростью 0,8 м/с под углом заглубления 30˚ по отношению к оси X. Диаметр кабель-троса 12 мм, а его длина 100 м.

На рис. 3.29 показаны линии кабель-троса, рассчитанные в работе [293], а также линии, рассчитанные по разработанной модели. На рис. 3.30 показано распределение силы натяжения вдоль кабель-троса в направлении координаты *S*.

Из рисунков 3.27 и 3.28 следует, что результаты моделирования согласуются с расчётами, приведёнными в [293] как по форме профиля кабель-троса, так и по величине силы натяжения троса возле БН ($S = 100$ м).

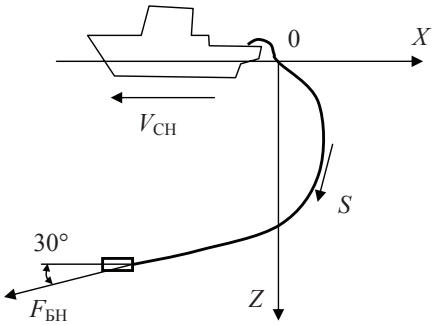


Рис. 3.28. Схема буксировки для привязной системы 2

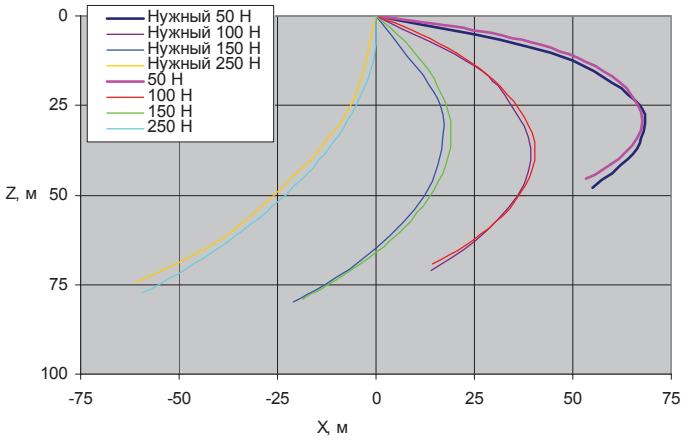


Рис. 3.29. Линии кабель-троса, рассчитанные в работе [293], а также линии, рассчитанные по разработанной модели

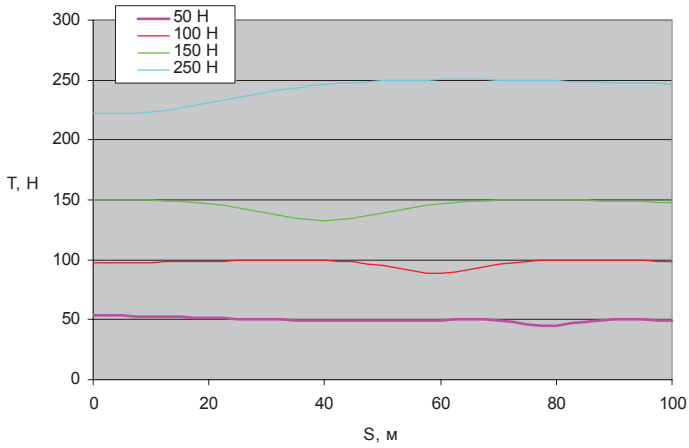


Рис. 3.30. Распределение силы натяжения вдоль кабель-троса в направлении координаты S

Привязная система 3. На примере расчёта из статьи Г.В. Бабкина (использованы данные, приведённые автором на рис. 2 и в таблицах 1 и 2) [315].

В отличие от схемы буксировки, показанной на рис. 3.26, в [315] использован БН с собственным движителем, упор (F_x) которого в направлении движения СБ со скоростью 0,5 м/с и заглубляющая сила (F_z) заданы в таблице 2 [315]. Диаметр кабель-троса 12 мм, а его длина 100 м. Схема буксировки показана на рис. 3.31.

На рис. 3.32 показаны линии кабель-троса, рассчитанные в работе [315], а также линии, рассчитанные по разработанной модели.

На рис. 3.33 показано распределение силы натяжения вдоль кабель-троса в направлении координаты S, полученное в результате математического моделирования, и модуль силы натяжения кабель-троса возле БН (S = 100 м) из работы [315] (обозначения показаны на рисунках).

Из рисунков 3.32 и 3.33 следует, что результаты моделирования согласуются с расчётами, приведёнными в [315] как по форме профиля кабель-троса, так и по величине силы натяжения троса возле БН (S = 100м).

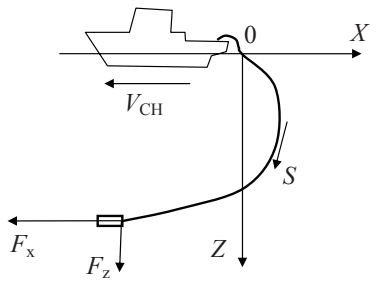


Рис. 3.31. Схема буксировки

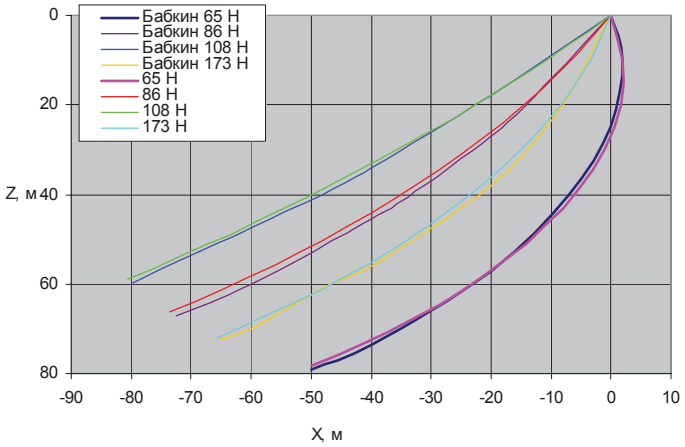


Рис. 3.32. Линии кабель-троса, рассчитанные в работе [315], а также линии, рассчитанные по разработанной модели

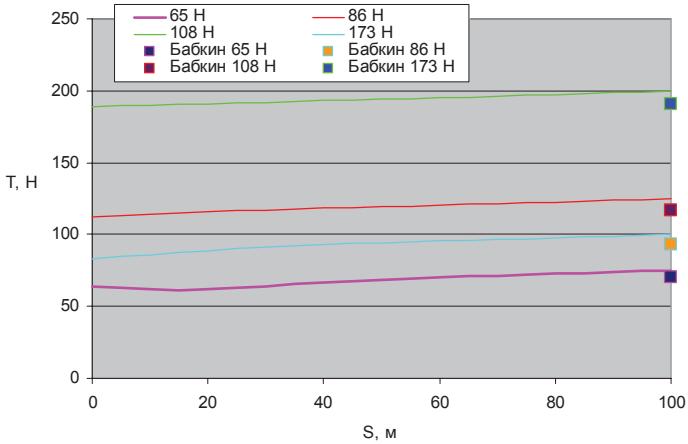


Рис. 3.33. Распределение силы натяжения вдоль кабель-троса в направлении координаты *S*, полученное в результате математического моделирования, и модуль силы натяжения кабель-троса возле БН ($S = 100$м) из работы [315]

Рассмотрим другой случай. Стальной трос диаметром 25 мм, длиной 141 м и погонной массой 3,5 кг/м прикреплён коренным концом к бую массой 100 кг (гидродинамическое сопротивление буя равно нулю), а ходовым — к якорю на глубине 100 м (дно моря плоское и постоянной глубины). Модуль Юнга троса принят равным 10^9 Па. Нормальный коэффициент сопротивления троса равен 1. В начальный момент времени трос имеет прямолинейную форму с наклоном в сторону, противоположную морскому течению со скоростью 1 м/с вдоль меридиана с юга на север. В момент времени $t = 0$ буй с тросом освобождается и начинает движение под действием силы тяжести и морского течения. На рис. 3.34 показаны положения троса и буя в определённые моменты времени (в секундах).

Распределение силы натяжения троса по его длине в разные моменты времени показано на рис. 3.35.

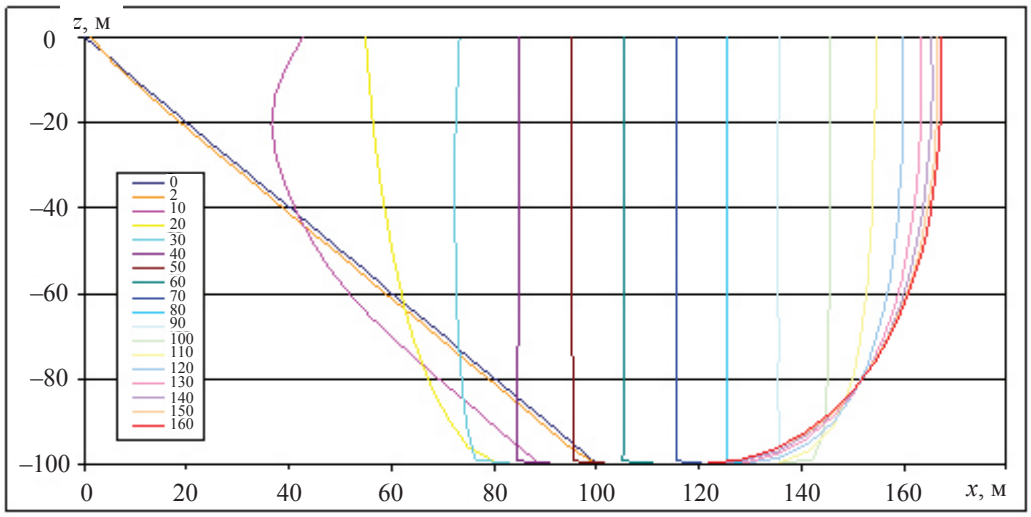


Рис. 3.34. Положение буя на тросе и троса в различные моменты времени

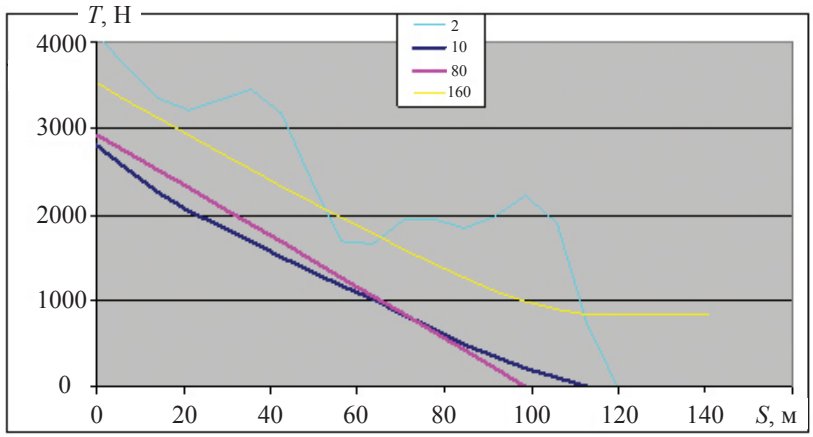


Рис. 3.35. Распределение силы натяжения троса по его длине в разные моменты времени (*S* — координата вдоль троса от коренного конца к ходовому)

Тестирование математической модели морской привязной системы и алгоритма расчёта (на примере подводной буксируемой системы, рис. 3.36)**.**

Параметры, задаваемые при моделировании динамики МПС с ГС:

1. Начальная длина ГС — 10 м.
2. Количество элементов в ГС — 20.
3. Начальный диаметр ГС — 25,2 мм для плотности 0,5 кг/м (при этом диаметре у троса 0-я плавучесть).
4. Плотность воды — 1000 кг/м^3.

5. Модуль Юнга материала ГС — $E = 10^8$ Па.
6. Модуль сдвига — 10^7 Па.
7. Присоединённая масса — 0.
8. Физическое время моделирования указано в примерах.
9. Тангенциальный коэффициент гидродинамического сопротивления — 0 (или 0,02).
10. Нормальный коэффициент сопротивления — 0 (1,0 для ускорения затухания).
11. Коффициент трения о преграду — 0.
12. Допустимая сила растяжения — 10^5 Н (разрушение при 10 т).
13. Амплитуда волн — 0 (спокойное море).
14. Период волнения моря — 5 с.
15. Число Куранта $C_к = 0{,}2$.
16. Составляющие вектора скорости морского течения Vx, Vy, Vz.
17. Силы, учитывающие влияние преград, Gx, Gy, Gz.
18. Начальные координаты ПА — X, Y, Z (длина ГС принята 10 м).
19. Начальные координаты СН (равны 0).

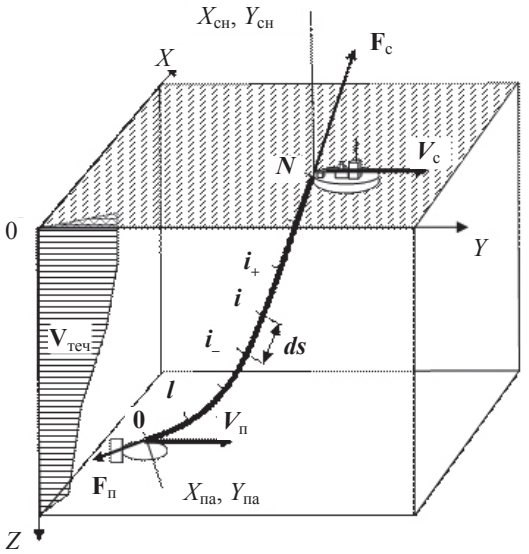


Рис. 3.36. Общая схема дискретизации ГС МПС на примере ПБС

Результаты тестирования ММ динамики ГС приведены на рис. 3.37–3.49.

Считаем, что ГС расположена параллельно оси Z. Ходовой и коренной концы ГС неподвижны. Рассмотрим различные случаи растяжения, изгиба и кручения в зависимости от удлинения ГС, скорости волны растяжения и т. п.

1. Растяжение ГС.

Время 22,4 мс (рис. 3.37–3.39). Удлинение ГС со стороны СН и ПА по 10 мм. Начальная длина ГС 10 м. ГС состоит из 20 элементов. Скорость волны растяжения 447 м/с. Плавучесть ГС равна нулю (нейтральная плавучесть).

Время 44,8 мс (рис. 3.40–3.41). Удлинение ГС со стороны СН и ПА по 10 мм. Начальная длина ГС 10 м. ГС состоит из 20 элементов. Скорость волны растяжения 447 м/с. Плавучесть ГС равна нулю (нейтральная плавучесть).

Время 44,8 мс (рис. 3.42–3.43). Тангенциальный коэффициент гидродинамического сопротивления ГС равен 0,02.

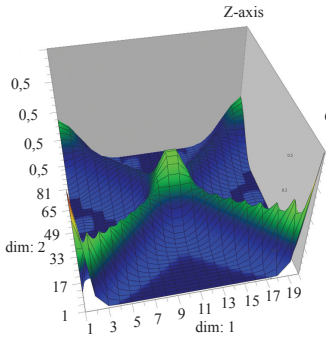


Рис. 3.37. Изменение длины элементов ГС. Время 22,4 мс

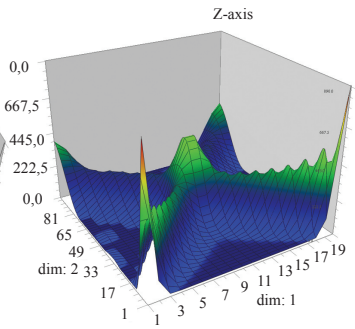


Рис. 3.38. Изменение силы растяжения элементов ГС. Время 22,4 мс

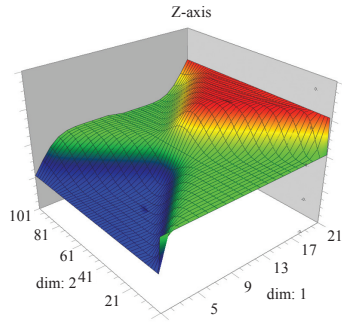


Рис. 3.39. Изменение координат элементов ГС. Время 22,4 мс

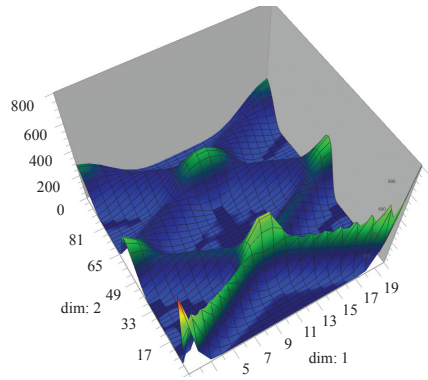


Рис. 3.40. Изменение силы растяжения элементов ГС

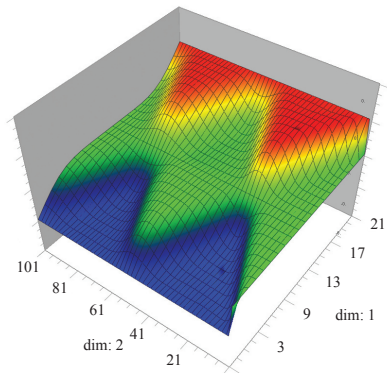


Рис. 3.41. Изменение координат элементов ГС

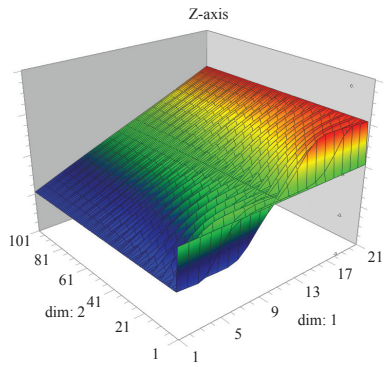


Рис. 3.42. Изменение координат элементов ГС

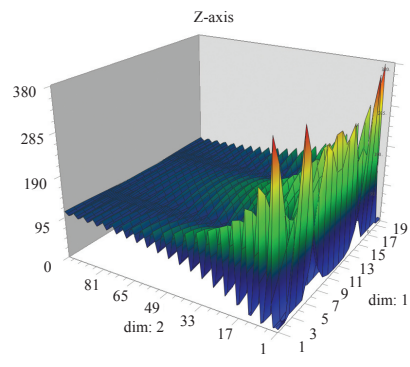


Рис. 3.43. Изменение силы растяжения элементов ГС

2. Изгиб и растяжение ГС.

Время 1,896 с (рис. 3.44–3.45). ГС состоит из 320 элементов. Тангенциальный коэффициент гидродинамического сопротивления ГС равен 0,02. Нормальный коэффициент гидродинамического сопротивления ГС равен 1. Удлинение ГС со стороны СН и ПА по 100 мм. Морское течение постоянное по глубине моря со скоростью 0,05 м/с, направлено по оси X.

3. Изгиб ГС.

Время 22,4 мс (рис. 3.46–3.47). На 0,5 длины ГС мгновенно перемещена в направлении оси X на 0,1 мм. Тангенциальный коэффициент гидродинамического сопротивления ГС равен 0,02. Нормальный коэффициент гидродинамического сопротивления ГС искусственно увеличен до 10. Морское течение постоянное по глубине моря со скоростью 0,05 м/с, направлено по оси X.

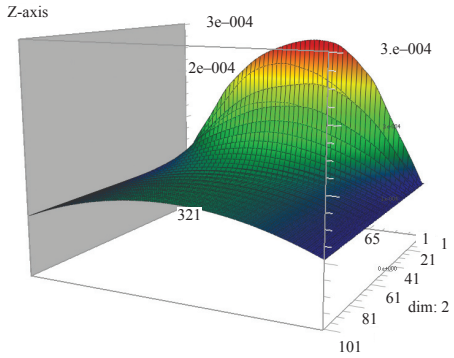


Рис. 3.44. Изменение координат элементов ГС в направлении оси X в результате совместного действия растяжения ГС и её прогиба под действием морского течения

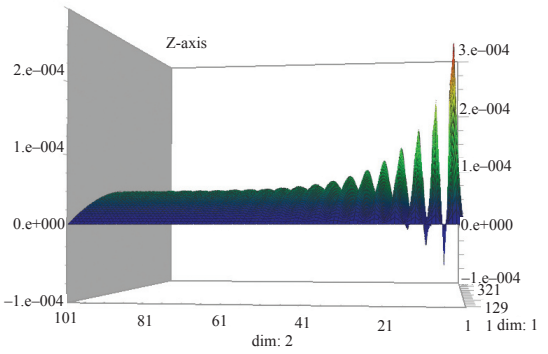
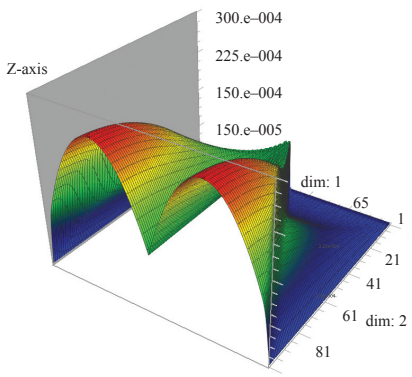


Рис. 3.45. Изменение координат элементов ГС в направлении оси X в результате прогиба ГС под действием только морского течения. 320 элементов ГС. Максимальный прогиб больше приблизительно в 1,2 раза



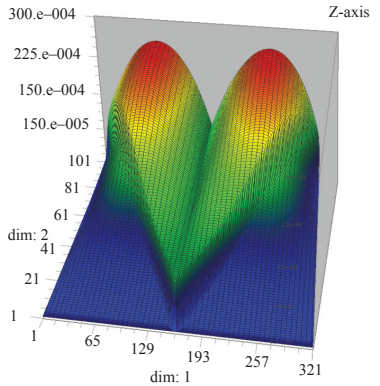


Рис. 3.46. Изменение координат элементов ГС в направлении оси X в результате совместного действия прогиба в середине длины ГС и её прогиба под действием морского течения. Время 22,4 мс

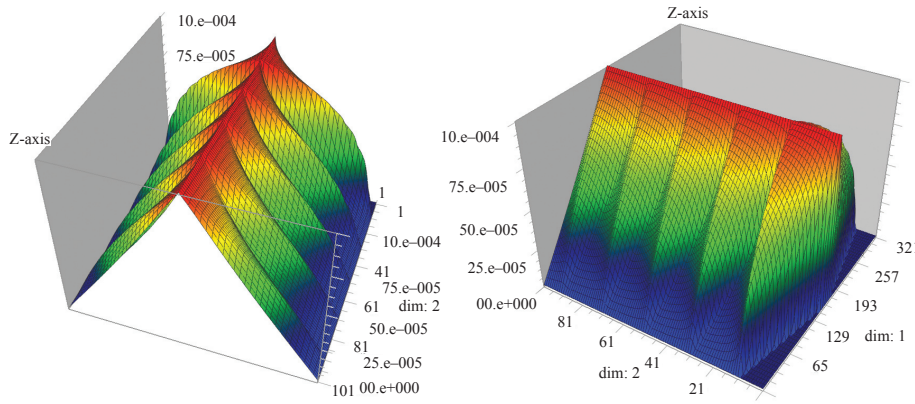


Рис. 3.47. Изменение координат элементов ГС в направлении оси X в результате прогиба в середине длины ГС. Нормальный коэффициент гидродинамического сопротивления ГС искусственно увеличен до 100. Время 22,4 мс

4. Кручение ГС на угол 0,1 рад посередине её длины (рис. 3.48–3.49).

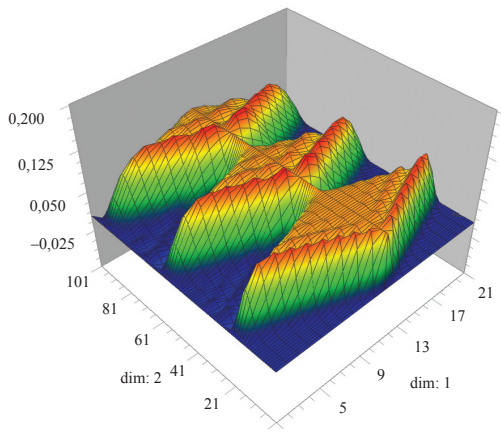


Рис. 3.48. Изменение угла кручения ГС. ГС закручена на угол 0,1 рад посередине её длины. Время 0,4 с

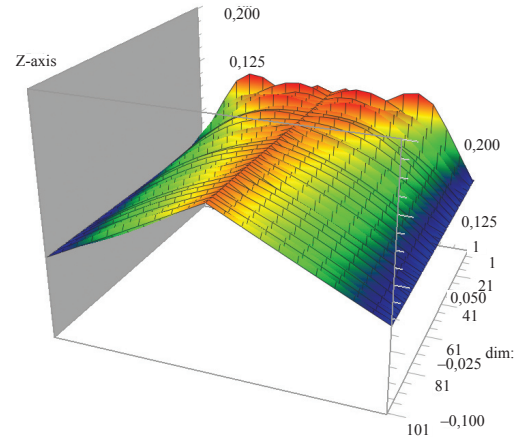


Рис. 3.49. Изменение угла кручения ГС. ГС закручена на угол 0,1 рад посередине её длины. Время 10,4 с

Выводы по разделу 3

В данном разделе рассмотрены классификация гибких связей, используемых в морских привязных системах, отдельные примеры сил, действующих на гибкие связи в процессе эксплуатации морских привязных систем (на примере подводных буксируемых систем). Отдельное место занимают уравнения динамики гибких связей в водной среде в условиях воздействия ветра и морского волнения. Здесь же рассмотрена классификация математических моделей и разработана математическая модель динамики гибких связей.

Разработана математическая модель МПС, которая позволяет решать следующие задачи:

1. Определять изменение формы ГС и сил её натяжения в процессе маневрирования СН и ПА с учётом морских волн, подводных течений, ветровых нагрузок на СН, глубины моря и её изменения в заданной акватории, массы и упругих свойств ГС.

2. Определять относительное положение СН и ПА в процессе их маневрирования.

3. Определять резонансные режимы растяжения ГС и максимальные нагрузки на ГС для оценки её прочности в процессе маневрирования СН и ПА.

4. Определять режимы маневрирования МПС, приводящей к образованию петель («колышек») на ГС. Обычно образуются на растянутых ГС при появлении в них «слабины» и наличии крутящего момента (крутящий момент зависит от натяжения ГС.

5. Определять режимы маневрирования МПС, приводящие к вибрации плохообтекаемых ГС в потоке.

Создание общей математической модели МПС с ГС служит основой для создания компьютерной модели МПС с ГС.

Создана компьютерная модель (компьютерная программа) динамики МПС с ГС, позволяющая моделировать ГС в составе МПС на основе 54 заданных параметров МПС и совершенствовать проектирование МПС с ГС. Компьютерная модель МПС с ГС позволяет учитывать множество параметров ГС и их изменения в процессе проектирования и выработать рекомендации для конструктивной разработки элементов МПС с ГС.

Проведено тестирование компьютерной программы модели динамики морской привязной системы (МПС), которое показало работоспособность программы, позволило отладить её и использовать в дальнейшем для проведения практических расчётов параметров МПС с ГС.

4

АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИБКИХ СВЯЗЕЙ МОРСКИХ ПРИВЯЗНЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ПОДВОДНЫХ БУКСИРУЕМЫХ СИСТЕМ

Наряду с обычными режимами функционирования для МПС характерны и аварийные режимы работы в особых условиях (экстремальные природные явления, техногенная деятельность человека и др.). Естественно, что они имеют важное значение для эксплуатации морской техники, и в частности МПС. Данный раздел посвящается рассмотрению этих вопросов.

4.1. Аварийные режимы работы (функционирования) морских привязных систем

Работы в открытом море всегда были связаны с повышенной опасностью. С годами количество различных сооружений в открытом море растет, техника становится все сложнее. Казалось бы, в результате усложнения удается сделать ее более надежной и безопасной, но, увы, количество аварий не снижается и, как шутят прогнозисты, самые крупные аварии еще впереди. Причины аварий разнообразные. Это и традиционное столкновение судов со стационарными сооружениями, и выбросы из скважин на нефтепромыслах, и сильные шторма, неудачные маневры при транспортировке, ошибки персонала при погрузочных и ремонтных работах, просто усталостные явления. Только на морских буровых вышках и платформах с 1955 по 1983 г. убытки от различных аварий составили примерно 800 млн долл. Разрушено и сильно повреждено не менее 100 различных объектов. Одна из таких характерных аварий — разрушение в норвежском секторе Северного моря платформы-отеля для сменного персонала «Александр Киланд», во время которой погибло 123 человека. Затраты на подъем и ремонт этой сравнительно небольшой платформы составили примерно 40 млн долл. [148, с. 395].

Способностью причинить вред могут обладать и человек, и техническое устройство, и природное явление. При этом вред может быть нанесён мгновенно или вследствие какого-то воздействия он может проявиться по истечении какого-то времени. Применительно к экологическим проблемам А. А. Касьяненко и К. Ю. Михайличенко приводят следующее определение опасности [146]. Опасность — совокупность свойств фактора среды обитания человека (или конкретной ситуации), определяющих их способность вызывать неблагоприятные для

здоровья эффекты при определенных условиях воздействия. Опасность является вероятностной категорией, которая может изменяться во времени и в пространстве. Под опасностью, связанной с конкретным событием или процессом, следует понимать вероятность проявления данного события или процесса в данном месте и в данное время.

Режимы работы, которые можно объединить под названием «аварийные режимы эксплуатации (функционирования)», в результате соединения особых факторов приводят к выходу вышеназванной технической системы из строя, либо могут привести к аварии и даже катастрофе.

Аварийные режимы работы можно отнести к неустановившимся режимам. Это может быть влияние на техническую систему или технический объект (в данном случае МПС) естественных условий (шторм, ураган, усиление ветра, подводные землетрясения, цунами и т.п.) или искусственных факторов (влияние на МПС каких-нибудь технических устройств — других судов, тралов, якорей, зацеп элемента МПС за подводное препятствие и т.п.) или, например, влияния взрывной волны в результате взрыва (воздушного, надводного, подводного).

Однако нас будут интересовать возможные аварийные режимы эксплуатации МПС, имеющих в своём составе ГС в виде троса (каната), цепи, кабель-троса и т.п., и могущие привести к выходу из строя всей МПС (либо её элемента) или невозможности в дальнейшем осуществлять нормальное функционирование.

Сложные и тяжелые режимы эксплуатации ГС сопряжены, как правило, с необходимостью специального изучения и определения действующих на них сил, учета нелинейности разрешающих уравнений, возможности потери устойчивости равновесия и с требованием исследования поведения системы в закритических состояниях [314]. Дифференциальные уравнения, описывающие их, имеют высокий порядок и содержат нелинейности сложного вида. Поиск их решения аналитически часто становится невозможным, что побуждает широко привлекать методы вычислительной математики. Решение таких задач оказывается возможным только современными методами нелинейного анализа, применение которых побуждает к выбору модификации разрешающих уравнений, обеспечивающих алгоритмичность и эффективность используемых подходов. До настоящего времени указанные исследования не получили необходимого развития из-за отсутствия достоверных математических моделей, которые достаточно просто и эффективно реализуются в виде алгоритмов и программ для численного решения рассматриваемых задач. Как считают Э. И. Блинов и др. [314], для описания влияния гидрометеосреды необходима адекватная пространственно-временная математическая модель изменения волнения, ветра и течения. Эта модель должна позволять воспроизводить реальные внешние условия как на коротких (секунды, минуты), так и на длинных (до года) интервалах времени с учетом вероятностной природы и основных характеристик гидрометеосреды. Ими предложено описание численного метода решения задачи управления гибким пространственно искривленным объектом при целенаправленных силовых воздействиях. На основе существующей математической модели поведения ГС появляется возможность

установления её предполагаемой формы, что позволит определить напряженно-деформированное состояние.

Иногда в технике для обозначения аварийных ситуаций используется понятие «помехи». Помехи в технике — область явлений, препятствующих нормальной работе различных технических средств и вызывающих отклонения параметров их работы [47, с. 89]. В военной технике помехи затрудняют обнаружение, распознавание, определение координат, селекцию (выбор) и сопровождение целей, а также связь и т.п. Помехи различают по физическим полям (электрические, магнитные, акустические, гравитационные и вибрационные); источнику возникновения (искусственные и естественные); среде распространения (космические, атмосферные, гидрофизические, сейсмические, геофизические); области и способам применения, диапазонам частот и др. признакам. Помехи могут создаваться специальными техническими устройствами и организованными действиями противника (преднамеренные искусственные помехи), а также индустриальными предприятиями (непреднамеренные искусственные помехи). Естественные помехи создается земными и внеземными природными источниками, излучающими электромагнитную, акустическую и др. энергию.

Многим океанологам хорошо известны неприятности, возникающие при работе с оборудованием, опущенным близко к поверхности дна на длинном тросе или кабель-тросе [7, с. 27]. Поскольку дно моря бывает обычно таким же неровным, как и любой участок суши, то оборудование, подвешенное на тросе, недолго сохранится в целости, особенно если оно при качке ударяется о скалистый грунт или волочится за судном по неровной поверхности дна. Оборудование (или сам кабель-трос) часто запутывается, в случае разрыва кабеля оно теряется.

Другая опасность в том, что кабель-трос, на котором подвешено оборудование, приходится использовать и во время качки. Это создает в кабеле чрезвычайно сильные напряжения, и при определенных условиях он может разорваться. Здесь уместно привести цифры, характеризующие так называемые гидродинамические пиковые силы, создаваемые волнением моря. Они особенно опасны во время подъема и опускания приборов и наблюдательных камер. Так, средняя величина пиковой силы засасывания при волнении 5 баллов составляет примерно 10 000 кг [7, с. 28]. Поэтому силы изменяются от 9000 до 18 000 кг, и в отдельных случаях могут достигать еще большой величины.

Затруднения часто возникают и при одновременном спуске удерживающего троса и электрического кабеля. Были случаи запутывания, и подача энергии прекращалась. Из отчета В. Биба следует, что его батисфера ни разу не коснулась дна [7]. Он считал, что это было бы небезопасно для кабины, разделяющей до какой-то степени колебания надводного судна. Он говорит, что ошибки в расчете длины троса при погружении на дно могут привести к тому, что излишки его соберутся на дне, трос ослабнет и может запутаться за какое-либо подводное препятствие. По этой причине батисферу опускали в средние слои океана и ни в коем случае не до самого дна. И все равно В. Биб неоднократно упоминал о подавленности, которая охватывала его в батисфере и мешала сосредоточиться для наблюдений.

Американец Р. Терри описывает случай запутывания троса, происшедший не так давно со сферой, несущей внутри фотоаппарат [7, с. 28]. Сфера, принадлежавшая Южно-Калифорнийскому университету, была названа бентографом и несколько лет успешно эксплуатировалась для фотографирования морского дна. Однажды у берегов Южной Калифорнии бентограф был спущен в одно из глубоких мест океана. Когда стали поднимать аппарат, почувствовали, что трос за что-то зацепился, исследовательское судно «Велеро» оказалось как бы на прочном якоре. После нескольких часов бесплодных стараний поднять сферу трос оборвался, похоронив дорогостоящее устройство на дне Тихого океана.

Считается, что безопасность опускаемых на тросе аппаратов значительно возрастет при использовании нейлононовых канатов [7, с. 29]. Нейлон практически не имеет веса в воде — в этом его преимущество. Кроме того, эластичность таких канатов должна смягчать толчки. Однако возникает опасение, что из-за эластичности нейлона кабина будет прыгать вверх и вниз, как на резиновой подвеске. Несмотря на прочность, нейлон быстро истирается и легко режется; тепло, образующееся при трении, способствует его разрушению. Как отмечает В. Г. Ажажа [7, с. 68], уже при волнении 3-4 балла работы со многими опускаемыми за борт приборами, в том числе и с малыми подлодками, на надводных НИС прекращаются.

В качестве примера можно привести случаи, приводящие к аварийным режимам работы МПС (табл. 4.1).

Авария (итал. avaria, араб. avar — повреждение, убыток) — неожиданный выход из строя машины, транспортного средства, летательного апарата и т.д., их повреждение [47, с. 48; 146].

Таблица 4.1. Случаи, приводящие к аварийным режимам работы МПС

№	Наименование режима	Характеристика режима	Вид МПС
1.	Зацеп БН за подводное препятствие (ЗО, валун и т.п.)	При осуществлении буксировки на рабочем режиме	БС, ПБС
2.	Зацеп ГС (буксирного троса, кабель-троса и т.п.) за подводное препятствие (ЗО, валун, ПЛ и т.п.)	При осуществлении буксировки на рабочем режиме, постановке-выборке	БС, ПБС
3.	Удар троса (БКЧ, КТ и т.п.) или элемента МПС о воду	При постановке-выборке МПС, на рабочем режиме	БС, ПБС, лебёдки СПУ
4.	Разрушение элемента системы в результате колебаний (резонансные частоты)	На переходных режимах при постановке-выборке МПС, на рабочем режиме	Стационарные МПС, СПУ, лебёдки, БС, ПБС
5.	Разрыв ГС (троса, кабель-троса и т.п.)	При буксировке в результате зацепа за ПП (при превышении динамической нагрузки, в результате чего резко возрастает натяжение в буксировочном тросе), при разрыве соединительных элементов БС (сростков каната), усталостные напряжения и т.п.	Стационарные МПС, БС, ПБС

Окончание таблицы 4.1

№	Наименование режима	Характеристика режима	Вид МПС
6.	Влияние морского течения	Появление дополнительных гидродинамических нагрузок	Стационарные МПС, БС
7.	Ветровое волнение	Волнение моря, вызванное ветром (шторм, ураган), усиливается качка судна на волнении, которая возбуждает вынужденные и параметрические колебания БС	Стационарные МПС, ПБС
8.	Резкий порыв ветра	Непредвиденный порыв ветра в результате падения воздушного давления	Стационарные МПС, БС, ПБС
9.	Изменение температуры морской воды	Влияние термоклина (появление внутренних волн на границе раздела вод разной плотности)	Стационарные МПС, ПБС
10.	Изменение температуры воздуха (обледенение троса или др. элемента МПС)	Резкий перепад температур воздуха при проведении операций (в высоких широтах)	Стационарные МПС, ПБС
11.	Экстренное (аварийное) торможение СН	Используется в случае возможности посадки СН на мель, столкновении с препятствием или другим судном, НК и т.п.	БС, ПБС
12.	Разрушение элементов МПС (ГС) при воздействии взрывной волны или механических повреждений при артстрельбе или взрыве (артстрельба: ударное воздействие снаряда (взрыв воздушный, надводный); подводный на мине и т.п.; близкий (контактный) и удалённый (неконтактный))	При постановке-выборке, при осуществлении буксировки на рабочем режиме. Конструкции НК должны выдерживать перегрузки до 250 g, длительность действия положительной фазы — 5 мс	Стационарные МПС, ПБС
13.	Экстренное (аварийное) увеличение скорости СН	Используется в случае возможности воздействия на СН и МПС неожиданных порывов ветра, урагана, различных видов оружия, когда требуется немедленный уход из опасной зоны. Это может привести к увеличению нагрузок в МПС (обрыву ГС, потере БН и БС)	БС, ПБС
14.	Дрейф МПС	Возможен как аварийный режим в случае выхода ГД из строя (СН с буксируемым ПА, срыв с якорей ПБУ в результате шторма) в отличие от дрейфующих плавучих буёв, для которых этот режим является нормальным	ППС

Военный энциклопедический словарь [204, с. 9–10] так трактует термин «авария»: *авария* (воен.) — событие, в результате которого повреждена либо разрушена техника, военно-промышленный объект или инженерное сооружение, не связанное с выполнением боевого задания и гибелью людей (в отличие от катастрофы). Наиболее распространённые причины аварии — неправильные действия личного состава, конструктивные и производственные недостатки техники, оборудования и материалов, влияние внешних (гидрометеорологических и др.) факторов. Предупреждение аварии обеспечивается соблюдением мероприятий безопасности, выполнением правил эксплуатации и сохранности оружия, военной техники, содержанием объектов и сооружений, высокой подготовкой и дисциплинированностью личного состава, надёжностью техники и прочностью объекта или сооружения, а также профилактикой по исключению наиболее характерных аварий, поломок и предпосылок во всех видах случаев.

Сходное определение этому термину приводится в глоссарии Американского Агентства Охраны Окружающей среды (US Environmental Protection Agency — EPA) [146]:

– опасность (hazard) — свойство, присущее данному агенту или ситуации, оказывать неблагоприятное влияние на что-либо (отсюда: вещество, агент, источник энергии или ситуация, обладающие этим свойством);

– опасные факторы — такие факторы, которые оказывают негативное воздействие на природные объекты и/или население.

Источниками опасности могут быть природные явления, стихийные бедствия, аварии, экономические кризисы, военные конфликты, террористические акты, бытовые ситуации и т.п.

Например, опасности мореплавания — различные природные и искусственные объекты и явления, могущие привести судно к потере управления, аварии и даже гибели. Могут быть навигационные (надводные и подводные); минные (наличие минных заграждений и плавающих мин) и гидрометеорологические (льды, штормы и т. п.) [7, с. 32].

А. А. Нарусбаев считает аварию сложным явлением. Как отмечает автор [66, с. 84], практически невозможно создать абсолютно надёжные технические средства. Им предложена классификация аварий подводных лодок по различным признакам [66, с. 74-75].

Катастрофа (греческое katastrophè — переворот, уничтожение, гибель) — внезапное действие; событие, влекущее за собой трагические последствия — разрушение, уничтожение, гибель чего-либо, кого-либо. В вооружённых силах катастрофой считается такое происшествие с военной техникой (танком, самолётом, кораблём и др.), повлёкшее за собой гибель людей [207, с. 590].

Как отмечает И. М. Короткин [47, с. 3], при создании и испытаниях кораблей не могут быть определены полностью качества личного состава, степень его подготовки к эксплуатации и обслуживанию кораблей. Слабые стороны людей и техники раскрываются наиболее рельефно при авариях. Одним из наиболее эффективных методов определения недостатков (положительных сторон) кораблей

и экипажей является изучение аварийных ситуаций. Изучение аварий кораблей позволяет обосновать выводы для улучшения конструктивно-технических элементов кораблей, повысить их мореходные и эксплуатационые (боевые) качества, а также разработать полезные рекомендации для усовершенствования выучки экипажей кораблей, поднять их дисциплину и организованность. Как показывает опыт, главные причины большинства аварий и катастроф кораблей заключаются в ошибках, в недостатках моряков и судостроителей.

На флоте (как гражданском, так и военном) существует порядок анализа произошедших аварий и катастроф и доведения их причин до всего личного состава. Автор, будучи на плавпрактике в 1979 г. на теплоходе СМП «Кильдин», был неоднократным участником периодического проведения такой учёбы по результатам несчастных случаев и аварий, произошедших на других судах и на других флотах, с доведением их до личного состава судна.

Процесс анализа безопасности какой-либо системы, как отмечает А.В. Горопашная [266], симметричен процессу анализа потенциальной опасности (вероятность осуществления отрицательного события и вероятность успешного результата события в сумме дают единицу). Практика показывает, что удобнее проследить реакцию систем корабля на аварийные воздействия, нежели определить сценарии успешного развития событий, поэтому анализ безопасности состоит в определении сценариев безопасного функционирования и вероятности наступления отрицательного события (вероятность отрицательного функционирования системы), что может привести к серьёзным последствиям. Негативное событие определяется исходя из задания оценки безопасности; такими событиями могут быть гибель корабля, взрыв на борту, несанкционированное использование оружия корабля и т.п. На основе полученных данных вычисляется вероятность безопасного функционирования корабля путём отнимания полученного результата из единицы.

Наиболее удобной и полной методикой анализа безопасности сложных технических объектов является методика, разработанная д.т.н., контр-адмиралом, профессором ВМА им. Н.Г. Кузнецова И.О. Рябининым [83] на основе логико-вероятностной теории. Метод объединяет в себе использование законов теории вероятностей и алгебры логики и разрабатывался для оценки надёжности кораблей ВМФ, но уже нашёл широкое применение при решении задач оценки безопасности и риска как в технике, так и в других областях. Логико-вероятностный анализ включает в себя четыре этапа [83, с. 32]:

1) создание физической модели развития аварии на объекте, безопасность которого исследуется;

2) создание математической модели на основании физической модели. Математической моделью является функция алгебры логики, которая состоит из возможных сценариев развития аварии; её аргументами являются события, которые могут произойти с анализируемым объектом;

3) в соответствии с созданной на втором этапе логической функцией выводится вероятностный полином, в котором присутствуют вероятности всех событий, которые входят в логическую функцию;

4) вычисление вероятности наступления негативного события, которое может привести к серьёзным потерям.

Существуют работы, направленные на исследование отдельных режимов работы судов: например, в [183] рассмотрены аварийные режимы работы судов:

1) маневрирование (в том числе в узкостях (с. 412, с. 766));

2) поворот (в т.ч. в шторм (с. 430));

3) торможение судна (с. 336): свободное торможение; торможение судна при работе гребного винта назад;

4) разгон судна (с. 339);

5) рыскание судна на волнении (с. 330);

6) плавание в узкостях (с. 412);

7) столкновение с другим судном (с. 630);

8) посадка судна на мель (с. 717);

9) повреждения руля, гребных винтов или машины (с. 444);

10) буксировка судна (в т.ч. аварийная: при буксировке буксируемый объект мешает движению буксира (судна) и делает невозможным маневрирование в шторм в узкостях);

11) аварийное торможение (маневр судна, связанный с гашением его скорости и инерции при непосредств. опасности столкновения с др. судном, берег. сооружением или посадки на мель. Выполняется с помощью специальных тормозных устройств или реверсирования главного двигателя на полный ход назад с одноврем. отдачей якорей).

Как правило, аварийные режимы эксплуатации характеризуются особой гидрометеорологической обстановкой в районе аварии, экстремальными и отличными от обычных условиями (временем года и суток, координатами места аварии и расстоянием до ближайших гаваней или порта, силой и направлением ветра, изменением температуры воздуха и воды, изменением ледовой обстановки, изменением уровня воды в результате приливов и отливов, постоянными и приливно-отливными течениями, глубиной воды в районе аварии, наличием вблизи судна, севшего на мель, других технических сооружений — буровых вышек и платформ, берега банок, камней), управляемостью и инерционными свойствами судов и плавсредств, повреждениями корпусов судов, винтов и рулей и т.п.

Множество аварийных случаев и ситуаций по целому ряду причин остаются неизвестными или скрываются, особенно если это касается военных или научных объектов. Как видим на отдельных примерах, возникает необходимость изучения взаимодействия элементов МПС, ППС и ПБС при ударе или зацепе, а также их взаимодействия с другими подводными объектами (ПО) при аварийных режимах эксплуатации.

Особое место среди аварий МПС с ГС занимают случаи зацепа ГС МПС [341, 387, 403].

Необходимо отметить, что комплексного исследования аварий МПС с ГС ранее не производилось, рассматривались вопросы эксплуатации отдельных судов и плавсредств [47, 148, 183, 331, 343], подводных лодок и аппаратов [7, 16, 25, 41,

50, 66, 68, 95, 169], другой подводной техники и конструкций [56, 63, 156, 157, 192], стационарных МПС: буровых вышек и платформ, гидротехнических сооружений [31, 51], отдельных МПС [11, 137, 145, 159], столкновения с морскими животными [48, 297, 420, 426, 429; 104, с. 212–221].

Помимо столкновений буксируемых объектов с морскими животными и млекопитающими часто происходят случаи столкновения элементов морских привязных систем (МПС), подводных буксируемых объектов (ПБО) и гибких связей (ГС) данных систем с другими посторонними подводными объектами (ППО), в качестве которых могут выступать подводные лодки, привязные и автономные подводные аппараты (ПА), другие ПБО, различные подводные препятствия, препятствия и объекты на дне (выступающие скалы, расщелины, кораллы, затонувшие корабли, утерянные рыбацкие сети и т.п.), элементы других МПС в процессе выполнения ими своего назначения. При этом последствия могут быть весьма тяжёлыми для сталкивающихся объектов.

На основании уроков аварий и катастроф совершенствовались требования к проектированию и постройке кораблей, улучшались наставления, правила и инструкции по их использованию.

Изучение ударных процессов относится к числу наиболее актуальных проблем прикладной механики, связанных с оценкой поведения различных конструкций в условиях воздействия интенсивных импульсных нагрузок, которые возникают при эксплуатации многих современных сооружений, машин и приборов [119, с. 3]. Рассматривая удар постороннего подводного объекта о гибкую связь, динамичность нагружения при деформировании характеризуется либо скоростью удара V_0 (в м/с), либо скоростью деформации $\dot{\varepsilon}$ (в 1/с), либо скоростью нарастания нагрузки $\dot{\sigma}$ (в кгс/мм^2/с). При этом скорость деформации является наиболее точной характеристикой динамического процесса нагружения. Поскольку процесс деформирования при ударе носит нестационарный характер, пользуются условным понятием средней скорости деформации.

Методы расчета элементов инженерных сооружений на удар при действии кратковременных сил (как однократных, так и повторных), обобщающие отечественный и зарубежный опыт, изложены в работах Н.К. Снитко, И.М. Рабиновича, А.П. Филиппова и др. При этом не ставится задача изучения внутренних закономерностей удара, а оценивается лишь его внешний эффект, т. е. функционирование тех или иных систем при ударном воздействии [119, с. 7]. Решение таких задач также сопряжено с большими трудностями, поскольку математическое описание реальных сложных динамических систем в большинстве случаев невозможно. Как считают Г.С. Батуев и другие [119], наиболее обоснованное суждение о поведении систем в условиях ударного воздействия можно сделать, лишь используя результаты эксперимента.

4.2. Классификация аварийных режимов функционирования МПС

Всё это касается и такой сложной технической системы, как МПС. Нами разработана и предложена классификация возможных аварий МПС по различным признакам (табл. 4.2) [415].

Такая классификация даёт возможность определить условия функционирования МПС и аварийные режимы роботы, аварийные случаи, которые возможны в этих условиях функционирования, даёт возможность перейти к моделированию аварийных режимов работы МПС.

На рис. 4.1 приведена схема классификации аварий МПС.

В табл. 4.3 приведены аварийные режимы работы МПС на примере ППС (ПБС). В табл. 4.4 приведены возможные воздействия и причины, вызвавшие аварийные режимы при режимах функционирования (работы) МПС.

Таблица 4.2. Классификация аварий МПС

По степени тяжести	– лёгкие; – средней тяжести; – тяжёлые
По причинам, которые к ним привели	– конструктивные (недостатки проекта); – несоблюдение стандартов, правил и инструкций при создании; – производственные дефекты; – нарушения личным составом правил и инструкций по обслуживанию механизмов оборудования; – отказ технических средств без последствий; – обстоятельства непреодолимой силы; – ошибки судовождения; – по непредвиденным на море обстоятельствам; – по неустановленным причинам
По времени протекания	– кратковременные; – длительные.
По видам (по характеру)	– пожар; – взрыв – гибель системы (разрушение, утопление); – посадка на мель; – удар о камни; – зацеп за подводное препятствие; – столкновение (с НК, ПЛ, подводным препятствием и т.п.); – другие аварии.
По наличию человеческих жертв	– аварии (без человеческих жертв); – катастрофы (с человеческими жертвами)
В зависимости от социально-политических явлений	– в мирное время (нормальные условия эксплуатации); – в военное время (при боевом воздействии); – в условиях кризисных явлений.

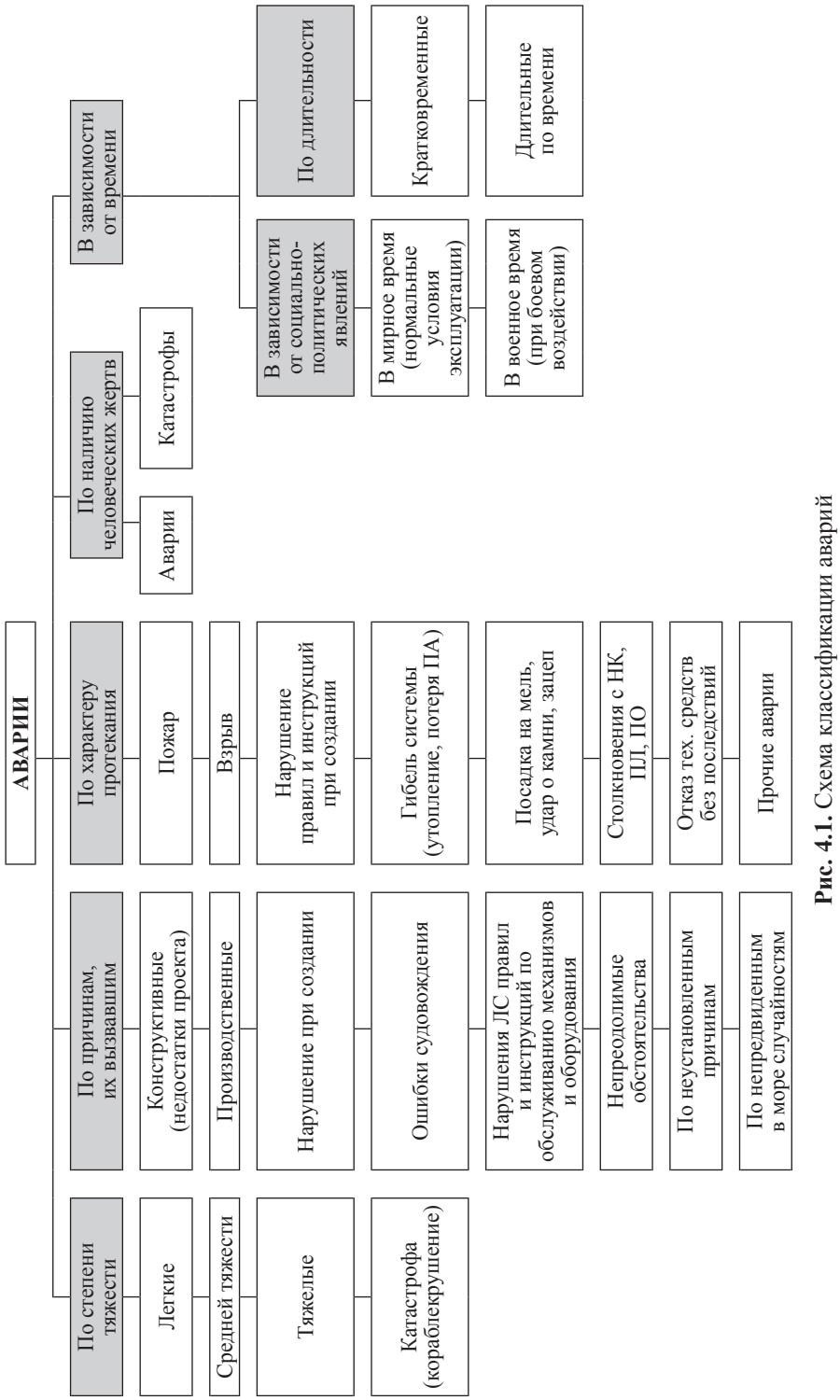


Рис. 4.1. Схема классификации аварий

Таблица 4.3. Сравнение обычных и аварийных режимов работы МПС на примере ППС или ПБС

№	Обычный режим работы		Возможный аварийный режим работы		
	Наименование режима	Характеристика режима	Наименование режима	Характеристика режима	Причина
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
1.	Режим подготовки и оснащения ППС или ПБС (на судне-носителе)	В процессе подготовки ППС к постановке производится сборка ППС на судне-носителе, оснащение её необходимыми элементами (приборами, заглубителями, обтекателями кабель-троса и т.п.), подготовка СПУ	Разрушение элементов МПС (ГС) при воздействии взрывной волны или механических повреждений	1. Артстрельба: ударное воздействие снаряда — взрыв воздушный; взрыв подводный, взрыв подводный на мине и т.п. 2. Взрыв: близкий (контактный) и удалённый (неконтактный). 3. Отказ технических средств без последствий	1. Конструктивные недостатки. 2. Производственные дефекты. 3. Нарушение правил и инструкций ЛС по обслуживанию механизмов и оборудования. 4. Непреодолимые обстоятельства. 5. По непредвиденным в море случайностям
2.	Режим постановки	Осуществляется опускание ППС в воду (при неподвижном судне-носителе на заданную глубину, травление кабель-троса, проверка и подключение питания, спуск НПА, ПБС) или при движущемся СН	1. Зацеп ГС (буксирного троса) за подводное препятствие (ЗО, валун, затонувший объект, ПЛ и т.п.), в результате чего возрастают динамические нагрузки, резко возрастает натяжение в буксировочном тросе. 2. Разрушение элемента системы в результате колебаний (резонансные частоты). 3. Разрыв ГС (троса, кабель-троса, при разрыве соединительных элементов БС (сростков каната) и т.п.). 4. Разрушение элементов МПС (ГС) при воздействии взрывной волны или механических повреждений	1. Зацеп ГС (буксирного троса) за подводное препятствие (ЗО, валун, затонувший объект, ПЛ и т.п.), в результате чего возрастают динамические нагрузки, резко возрастает натяжение в буксировочном тросе. 2. Разрушение элемента системы в результате колебаний (резонансные частоты). 3. Превышение динамической нагрузки в результате чего резко возрастает натяжение в буксировочном тросе). 4. Разрушение элементов МПС (ГС) при воздействии взрывной волны или механических повреждений	1. Конструктивные недостатки. 2. Производственные дефекты. 3. Нарушение правил и инструкций ЛС по обслуживанию механизмов и оборудования. 4. Непреодолимые обстоятельства. 5. По непредвиденным в море случайностям. 1. Влияние морского течения. 2. Ветровое волнение, вызванное ветром (шторм, ураган). 3. Влияние температуры морской воды (обледенение). 4. Влияние температуры воздуха (обледенение). 1. Нарушение стандартов при изготовлении, скрытые дефекты

Продолжение таблицы 4.3

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
3.	Режим разгона и выхода судна-носителя на заданную скорость буксировки (отсутствует у стационарных ППС)	Выход на заданный режим буксировки	1. Аварийное торможение. 2. Посадка на мель. 3. Столкновение с НК, ЗПО, ПЛ. 4. Нарушение инструкций и правил эксплуатации ЛС	1. Отказ технических средств СН. 2. Ошибки судовождения. 3. Непреодолимые обстоятельства. 4. Уничтожение элемента системы (потеря БА, ГС системы и т.п.). 5. Прочие аварии	1. Нарушение правил и инструкций ЛС по обслуживанию механизмов и оборудования. 2. По неустановленным причинам
4.	Рабочий режим	Буксировка ПБС. Для МПС, например, ППС в состоянии равновесия на глубине. Для двухзвенных систем — выход НПА (робот-модуль) из «гаража»	1. Зацеп ГС (буксирного троса) за подводное препятствие (ЗО, валун, затонувший объект, ПЛ и т.п.), в результате чего возрастают динамические нагрузки, резко возрастает натяжение в буксировочном тросе.	1. Ошибки судовождения. 2. Непреодолимые обстоятельства. 3. Отказ технических средств без последствий.	1. Конструктивные недостатки. 2. Производственные дефекты. 3. Нарушение правил и инструкций ЛС по обслуживанию механизмов и оборудования. 4.Непреодолимые обстоятельства. 5.По непредвиденным в море случайностям.
			2. Разрушение элемента системы в результате колебаний (резонансные частоты).	1. Появление дополнительных гидродинамических нагрузок. 2. Усиление качки судна на волнении, которая возбуждает вынужденные и параметрические колебания БС. 3. Влияние термоклина (появление внутренних волн на границе раздела вод разной плотности). 4. Резкий перепад температур воздуха при проведении операций (в высоких широтах).	1. Влияние морского течения. 2. Ветровое волнение, вызванное ветром (шторм, ураган). 3. Влияние температуры морской воды (обледенение). 4. Влияние температуры воздуха (обледенение).
			3. Разрыв ГС (троса, кабель-троса, при разрыве соединительных элементов БС (сростков каната) и т.п.). 4. Разрушение элементов МПС (ГС) при воздействии взрывной волны или механических повреждений	1. Усталостные напряжения в элементах конструкции. 1. Артстрельба: ударное воздействие снаряда — взрыв воздушный; взрыв подводный, взрыв подводный на мине и т.п. 2. Взрыв: близкий (контактный) и удалённый (неконтактный)	1. Нарушение стандартов при изготовлении, скрытые дефекты

Окончание таблицы 4.3

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
5.	Режим торможения и остановка (отсутствует у стационарных ППС)	Характерен для ПБС	1. Аварийное торможение. 2. Посадка на мель. 3. Столкновение с НК, ЗПО, ПЛ. 4. Нарушение инструкций ЛС при эксплуатации системы	1. Отказ технических средств СН. 2. Ошибки судовождения. 3. Непреодолимые обстоятельства. 4. Уничтожение элемента системы (потеря БА, ГС системы и т.п.). 5. Прочие аварии	1. Нарушение правил и инструкций ЛС по обслуживанию механизмов и оборудования. 2. По неустановленным причинам
6.	Процесс подъёма ПБС	Для МПС — процесс подъёма системы с глубины. Для ПБС — процесс выборки кабель-троса, подъём НПА	1. Зацеп ГС (буксирного троса) за подводное препятствие (ЗО, валун, затонувший объект, ПЛ и т.п.), в результате чего возрастают динамические нагрузки, резко возрастает натяжение в буксировочном тросе. 2. Разрушение элемента системы в результате колебаний (резонансные частоты). 3. Разрыв ГС (троса, кабель-троса, при разрыве соединительных элементов БС сростков каната и т.п.). 4. Разрушение элементов МПС (ГС) при воздействии взрывной волны или механических повреждений	1. Ошибки судовождения. 2. Непреодолимые обстоятельства. 3. Отказ технических средств без последствий. 2. Разрушение элемента системы в результате колебаний (резонансные частоты). 3. Превышение динамической нагрузки, в результате чего резко возрастает натяжение в буксировочном тросе). 4. Разрушение элементов МПС (ГС) при воздействии взрывной волны или механических повреждений	1. Конструктивные недостатки. 2. Производственные дефекты. 3. Нарушение правил и инструкций ЛС по обслуживанию механизмов и оборудования. 4. Непреодолимые обстоятельства. 5. По непредвиденным в море случайностям. 1. Влияние морского течения. 2. Ветровое волнение, вызванное ветром (шторм, ураган). 3. Усталостные напряжения. 4. Влияние температуры воздуха (обледенение). 1. Нарушение стандартов при изготовлении, скрытые дефекты
7.	Процесс разборки МПС (выведение из рабочего состояния)	Разборка буксирной линии и размещение её на судне (намотка кабель-троса на вьюшки или барабаны, НПА на стеллажах или ложементах, киль-блоках), отключение питания	1. Разрыв ГС (троса, кабель-троса, при разрыве соединительных элементов БС (сростков каната) и т.п.). 2. Поражение электротоком ЛС	1. Деформации ГС системы (изгибные напряжения). 2. Накопление статического электричества, поражения электротоком	1. Усталостные напряжения в элементах конструкции. 1. Нарушение правил и инструкций ЛС по обслуживанию механизмов и оборудования

Таблица 4.4. Воздействия и причины, вызвавшие аварийные режимы при режимах функционирования (работы) МПС

№	Режим функционирования	Возможные воздействия, виды аварий	Причины, вызвавшие аварийные режимы
1	*2*	*3*	*4*
1.	Подача (доставка, транспортировка) МПС к месту функционирования (эксплуатации)	1.1. Влияние морского течения	Появление дополнительных гидродинамических нагрузок
		1.2. Ветровое волнение	Волнение моря, вызванное ветром (шторм, ураган), усиливается качка судна на волнении, которая возбуждает вынужденные и параметрические колебания БС
		1.3. Резкий порыв ветра	Непредвиденный порыв ветра в результате падения воздушного давления
		1.4. Изменение температуры морской воды	Влияние термоклина (появление внутренних волн на границе раздела вод разной плотности)
		1.5. Изменение температуры воздуха (обледенение ГС или др. элементов МПС, надстроек и палубных механизмов судна)	Возможно в высоких широтах или при эксплуатации МПС в зимнее время при низких температурах воздуха, связанных с временем года. Опрокидывание МПС в результате потери остойчивости
		1.6. Экстренное (аварийное) торможение СН	Используется в случае возможности посадки СН на мель, столкновении с препятствием или другим судном, НК и т.п.
		1.7. Экстренное (аварийное) увеличение скорости судна-буксировщика	Используется в случае возможности воздействия на СН и МПС неожиданных порывов ветра, урагана, различных видов оружия, когда требуется немедленный уход из опасной зоны. Это может привести к увеличению нагрузок в МПС (обрыву ГС, потере БС)
		1.8. Посадка на мель	В результате ошибок судовождения
		1.9. Удар о подводное препятствие (ПП)	Возможен при неизвестных гидрологических условиях, неожиданном появлении ПЛ, крупного морского животного, затонувшего объекта, неотмеченного на картах
		1.10. Дрейф МПС	Возможен как аварийный режим в случае выхода ГД из строя (СН с буксируемым ПА, срывание с якорей ПБУ в результате шторма) в отличие от дрейфующих плавучих буёв, для которых этот режим является нормальным
		1.11. Столкновение МПС (или судна-буксировщика) с НК, судном, ПЛ, ПП и т.п.	В результате ошибок судовождения или нарушения другим судном (НК, ПЛ и т.п.) правил судовождения
		1.12. Ошибки судовождения	Возникают в результате недостаточной подготовки штурмана (капитана, лоцмана) судна-буксировщика
		1.13. Зацеп ГС	Возможен при контакте с затонувшим объектом

Продолжение таблицы 4.4

1	*2*	*3*	*4*
		1.14. Разрыв ГС (троса, кабель-троса и т.п.)	При буксировке в результате зацепа за ПП (при превышении динамической нагрузки, резко возрастает натяжение в буксирном тросе), при разрыве соединительных элементов БС, усталостные напряжения в ГС
		1.15. Отказ технических средств (ТС) МПС и судна-буксировщика (СН)	Выход из строя ТС по причине поломки деталей и узлов, в результате усталостных разрушений и т.п. Может привести к невозможности доставки МПС к месту назначения
		1.16. Непреодолимые обстоятельства (форс-мажор)	Обычно к ним относят природные явления (землетрясения, цунами), военные действия, торговые эмбарго, забастовки и т.п.
		1.17. Непредвиденные на море случайности	Как правило, это могут быть случайные факторы или явления, которые невозможно предусмотреть заранее
2.	Установка и подготовка МПС к функционированию на месте эксплуатации	2.1. Удар троса (БКЧ, КТ и т.п.) или элемента МПС о воду	При постановке-выборке МПС, на рабочем режиме
		2.2. Зацеп ГС (буксирного троса, кабель-троса и т.п.) за подводное препятствие (ЗО, валун, ПЛ и т.п.)	Возможен при неизвестных гидрологических условиях, неожиданном появлении ПЛ, крупного морского животного, затонувшего объекта, неотмеченного на картах
		2.3. Разрыв ГС (троса, кабель-троса и т.п.)	При буксировке в результате зацепа за ПП (при превышении динамической нагрузки, резко возрастает натяжение в буксирном тросе), при разрыве соединительных элементов БС
		2.4. Разрушение элемента системы в результате колебаний (резонансные частоты)	Разрыв (поломка) соединительных элементов МПС и ГС
		2.5. Отказ технических средств (ТС) МПС и судна-буксировщика	Выход из строя ТС по причине поломки деталей и узлов, в результате усталостных разрушений, скрытых производственных дефектов, конструктивных недостатков и т.п. Может привести к невозможности установки и подготовки МПС на месте эксплуатации
		2.6. Посадка на мель	В результате ошибок судовождения
		2.7. Удар о подводное препятствие (ПП), получение пробоины	Возможен при неизвестных гидрологических условиях, неожиданном появлении крупного морского животного, затонувшего объекта, неотмеченного на картах. Опрокидывание и затопление МПС
		2.8. Влияние морского течения	Появление дополнительных гидродинамических нагрузок. Может привести к невозможности установки и подготовки МПС на месте эксплуатации

Продолжение таблицы 4.4

1	*2*	*3*	*4*
		2.9. Ветровое волнение	Волнение моря, вызванное ветром (шторм, ураган). Может привести к невозможности установки и подготовки МПС к функционированию на месте эксплуатации. Опрокидывание МПС в результате потери остойчивости
		2.10. Непредвиденный порыв ветра	Резкий порыв ветра в результате падения воздушного давления. Опрокидывание МПС в результате потери остойчивости
		2.11. Изменение температуры морской воды	Влияние термоклина (появление внутренних волн на границе раздела вод разной плотности)
		2.12. Изменение температуры воздуха (обледенение ГС или элементов МПС)	Возможно в высоких широтах или при эксплуатации МПС в зимнее время при низких температурах воздуха
3.	Начало функционирования (эксплуатации): введение в действие, отладка системы	3.1. Разрыв ГС (троса, кабель-троса и т.п.) или соединительных элементов (сростков каната) ГС	При начале эксплуатации в результате воздействия внешних нагрузок (при превышении динамических нагрузок, воздействия течения, ветра и волн), при усталостных напряжениях в ГС
		3.2. Разрушение элемента системы в результате колебаний (резонансные частоты)	Разрыв (поломка) соединительных элементов МПС и ГС в результате производственных дефектов и конструктивных недостатков
		3.3. Отказ технических средств (ТС) МПС и судна-буксировщика	Выход из строя ТС по причине поломки деталей и узлов, в результате усталостных разрушений, скрытых производственных дефектов, конструктивных недостатков и т.п. Может привести к невозможности установки и подготовки МПС на месте эксплуатации
		3.4. Влияние морского течения	Появление дополнительных гидродинамических нагрузок. Может привести к невозможности функционирования МПС на месте эксплуатации. Опрокидывание МПС в результате потери остойчивости
		3.5. Ветровое волнение	Волнение моря, вызванное ветром (шторм, ураган, цунами), вызывает появление дополнительных динамических нагрузок. Воздействие волн-солитонов. Может привести к невозможности функционирования МПС на месте эксплуатации. Опрокидывание МПС в результате потери остойчивости
		3.6. Непредвиденный порыв ветра	Резкий порыв ветра в результате падения воздушного давления. Опрокидывание МПС в результате потери остойчивости или срыв с якорей
		3.7. Изменение температуры морской воды	Влияние термоклина (появление внутренних волн на границе раздела вод разной плотности)

Продолжение таблицы 4.4

1	*2*	*3*	*4*
		3.8. Изменение температуры воздуха (обледенение ГС или элементов МПС)	Возможно в высоких широтах или при эксплуатации МПС в зимнее время при низких температурах воздуха
		3.9. Пожар	Несоблюдение правил пожарной безопасности
		3.10. Взрыв	Несоблюдение правил эксплуатации технических средств МПС
		3.11. Затопление МПС	В результате получения пробоины
4.	Функционирование (эксплуатация) МПС: использование по назначению, выход на проектные мощности	4.1. Влияние морского течения	Появление дополнительных гидродинамических нагрузок
		4.2. Ветровое волнение	Волнение моря, вызванное ветром (шторм, ураган, цунами, землетрясение)
		4.3. Резкий порыв ветра	Непредвиденный порыв ветра в результате падения воздушного давления
		4.4. Изменение температуры морской воды	Влияние термоклина (появление внутренних волн на границе раздела вод разной плотности)
		4.5. Изменение температуры воздуха (обледенение ГС или др. элемента МПС)	Резкий перепад температур воздуха при проведении операций (в высоких широтах)
		4.6. Разрыв ГС (троса, кабель-троса и т.п.)	Превышение динамической нагрузки: воздействия внешних факторов (удар судна о МПС при швартовке, влияние штормовых волн, цунами, землетрясений, усталостные напряжения в ГС и т.п.)
		4.7. Разрушение элемента системы в результате колебаний (резонансные частоты)	Может привести к невозможности функционирования МПС на месте эксплуатации
		4.8. Разрушение элементов МПС (ГС) при воздействии взрывной волны или механических повреждений при артстрельбе или взрыве	Артстрельба: ударное воздействие снаряда — взрыв воздушный, надводный, подводный; на мине и т.п. (конструкции НК должны выдерживать перегрузки до 250 g, длительность действия положительной фазы — 5 мс). Взрыв: близкий (контактный) и удалённый (неконтактный)
		4.9. Разрушение элементов МПС	Скрытые производственные дефекты или усталостные напряжения
		4.10. Выход оборудования МПС из строя	В результате несоблюдения технологических процессов и условий эксплуатации обслуживающим персоналом
		4.11. Пожар	Несоблюдение правил пожарной безопасности
		4.12. Взрыв	Несоблюдение правил эксплуатации технических средств МПС
		4.13. Затопление МПС	В результате получения пробоины от постороннего судна при швартовке

Продолжение таблицы 4.4

1	*2*	*3*	*4*
5.	Окончание функционирования (эксплуатации) МПС и подготовка её к выводу из эксплуатации	5.1. Выход оборудования МПС из строя	В результате несоблюдения технологических процессов вывода из эксплуатации
		5.2. Влияние морского течения	Появление дополнительных гидродинамических нагрузок. Опрокидывание МПС в результате потери остойчивости
		5.3. Ветровое волнение	Волнение моря, вызванное ветром (шторм, ураган, цунами, землетрясение). Опрокидывание МПС
		5.4. Резкий порыв ветра	Непредвиденный порыв ветра в результате падения воздушного давления. Опрокидывание МПС
		5.5. Изменение температуры воздуха (обледенение ГС, элемента МПС, надстроек и палубных механизмов системы, превышение снеговой нагрузки)	Резкий перепад температур воздуха при проведении операций (в высоких широтах). Опрокидывание МПС в результате потери остойчивости
		5.6. Разрыв ГС (троса, кабель-троса и т.п.)	Превышение динамической нагрузки в результате воздействия внешних факторов (удар судна о МПС при швартовке или начале буксировки, влияние штормовых волн, цунами, землетрясений, усталостные напряжения в ГС и т.п.)
		5.7. Пожар	Несоблюдение правил пожарной безопасности
		5.8. Взрыв	Несоблюдение правил эксплуатации технических средств МПС
		5.9. Затопление МПС	Несоблюдение технологических процессов вывода из эксплуатации, получение пробоины от постороннего судна при швартовке
6.	Выведение МПС из эксплуатации	6.1. Выход оборудования МПС из строя	Несоблюдение техпроцессов вывода из эксплуатации
		6.2. Влияние морского течения	Появление дополнительных гидродинамических нагрузок. Опрокидывание МПС в результате потери остойчивости
		6.3. Ветровое волнение	Волнение моря, вызванное ветром (шторм, ураган). Опрокидывание МПС
		6.4. Резкий порыв ветра	Непредвиденный порыв ветра в результате падения воздушного давления. Опрокидывание МПС
		6.5. Изменение температуры воздуха (обледенение ГС или др. элемента МПС, превышение допустимой снеговой нагрузки)	Резкий перепад температур воздуха при проведении операций (в высоких широтах). Опрокидывание МПС в результате потери остойчивости

Продолжение таблицы 4.4

1	*2*	*3*	*4*
		6.6. Разрыв ГС (троса, кабель-троса и т.п.)	При превышении динамической нагрузки в результате воздействия внешних факторов (удар судна о МПС при швартовке или начале буксировки, влияние штормовых волн, цунами, землетрясений, усталостные напряжения в ГС и т.п.)
		6.7. Пожар	Несоблюдение правил пожарной безопасности
		6.8. Взрыв	Несоблюдение правил эксплуатации технических средств МПС
		6.9. Затопление МПС	Несоблюдение технологических процессов вывода из эксплуатации, получение пробоины от постороннего судна
7.	Транспортировка к месту хранения (утилизации)	7.1. Влияние морского течения	Появление дополнительных гидродинамических нагрузок
		7.2. Ветровое волнение	Волнение моря, вызванное ветром (шторм, ураган, цунами, землетрясение). Усиливается качка судна-буксировщика на волнении, которая возбуждает вынужденные и параметрические колебания БС
		7.3. Резкий порыв ветра	Непредвиденный порыв ветра в результате падения воздушного давления. Возможно опрокидывание МПС
		7.4. Изменение температуры морской воды	Влияние термоклина (появление внутренних волн на границе раздела вод разной плотности)
		7.5. Изменение температуры воздуха (обледенение ГС или др. элемента МПС, надстроек и палубных механизмов)	Резкий перепад температур воздуха при проведении операций буксировки. Возможно опрокидывание МПС в результате потери остойчивости. Затопление МПС
		7.6. Экстренное (аварийное) торможение судна-буксировщика	Используется в случае возможности посадки судна-буксировщика или МПС на мель, столкновении с препятствием или другим судном, НК, ПЛ, морским животным и т.п. Это может привести к навалу МПС на судно-буксировщик (обрыву ГС, потере БН и БС)
		7.7. Экстренное (аварийное) увеличение скорости судна-буксировщика	Используется в случае возможности воздействия на СБ или МПС неожиданных порывов ветра, урагана, различных видов оружия, когда требуется немедленный уход из опасной зоны. Приводит к увеличению нагрузок в МПС (обрыву ГС, потере БН и БС)
		7.8. Дрейф МПС	Возможен как аварийный режим в случае выхода ГД из строя (СН с буксируемым ПА, рыв с якорей ПБУ в результате шторма), в отличие от дрейфующих плавучих буёв, для которых этот режим является нормальным
		7.9. Разрыв ГС (троса, кабель-троса и т.п.)	При буксировке в результате зацепа за ПП (при превышении динамической нагрузки, в результате чего резко возрастает натяжение в буксировочном тросе), при разрыве соединительных элементов БС (сростков каната), усталостные напряжения ГС и т.п.

Окончание таблицы 4.4

1	*2*	*3*	*4*
		7.10. Удар о подводное препятствие (ПП)	Возможен при неизвестных гидрологических условиях, неожиданном появлении ПЛ, крупного морского животного, затонувшего объекта, неотмеченного на картах
		7.11. Столкновение СБ или МПС с НК, судном, ПЛ, ПП и т.п.	В результате ошибок судовождения или нарушения другим судном (НК, ПЛ и т.п.) правил судовождения
8.	Хранение (утилизация) МПС	8.1. Ветровое волнение	Волнение моря, вызванное ветром (шторм, ураган, цунами, землетрясение)
		8.2. Резкий порыв ветра	Непредвиденный порыв ветра в результате падения воздушного давления
		8.3. Изменение температуры воздуха (обледенение ГС, элемента МПС)	Резкий перепад температур воздуха при проведении операций (в высоких широтах)
		8.4. Разрыв ГС (швартовных тросов, кабель-тросов и т.п.)	Превышение динамической нагрузки в результате воздействия внешних факторов (удар судна о МПС при швартовке, хранение МПС в месте разделки, усталостные напряжения в ГС, по причине старения тросов и т.п.)
		8.5. Разрушение элементов МПС (в т.ч. ГС) при воздействии взрывной волны или механических повреждений при артстрельбе или взрыве	Артстрельба: ударное воздействие снаряда — взрыв воздушный; взрыв надводный, взрыв подводный; взрыв на мине и т.п. (конструкции НК должны выдерживать перегрузки до 250 g, длительность действия положительной фазы — 5 мс). Взрыв: близкий (контактный) и удалённый (неконтактный)
		8.6. Разрушение элементов МПС	В результате скрытых производственных дефектов или усталостных напряжений
		8.7. Выход оборудования МПС из строя	В результате несоблюдения технологических процессов и условий консервации оборудования обслуживающим персоналом
		8.8. Пожар	Несоблюдение правил пожарной безопасности
		8.9. Взрыв	Несоблюдение правил эксплуатации технических средств МПС
		8.10. Затопление МПС	В результате получения пробоины от постороннего судна при швартовке или хранении в месте разделки
		8.11. Отказ технических средств (ТС) МПС	Выход из строя ТС по причине поломки деталей и узлов, в результате усталостных разрушений и т.п.

Принятые в таблице сокращения:

БН — буксируемый носитель;
БНПА — буксируемый необитаемый ПА;
БПА — буксируемый ПА;
БС — буксируемая система;
ГД — главный двигатель;
ГК — грузонесущий кабель;
ГС — гибкая связь;
ЗО — затонувший объект;
КБ — кабель-буксир;
КТ — кабель-трос;
МПС — морская привязная система;
ПА — подводный аппарат;
ПБС — подводная буксируемся система;
ПП — подводное препятствие;
СБ — судно-буксировщик;
СН — судно-носитель.

При эксплуатации тралового комплекса (система «траулер – траловая лебёдка – ваер – трал») возникают режимы работы, которые можно объединить под названием «аварийные режимы работы», и которые в результате сочетания особых факторов приводят к выходу его из строя [415]. Н. В. Парин приводит следующее высказывание об аварийной ситуации на исследовательском судне [74, с. 220]: «...особенно запомнился один задев, когда траловая доска, попавшая в расщелину, превратилась у нас в мёртвый якорь, и вышедшее на вертикальный трос (моряки говорят «на панер») и содрогающееся судно не могло на любом курсе сдвинуться с места, пока 25-мм стальной ваер не лопнул с таким громоподобньм звуком, что создалось полное впечатление взрыва».

4.3. Примеры аварийных режимов работы МПС

Рассмотрим некоторые аварийные работы МПС на примере ППС (ПБС), используя полученную математическую модель динамики МПС и разработанную на основе алгоритма компьютерную модель описания гибких связей МПС (на примере ПБС).

Ниже приведены режимы движения судна, которые вполне можно отнести к аварийным:

– маневрирование (в том числе в узкостях);

– поворот (в т.ч. в шторм);

– торможение судна (свободное торможение; торможение судна при работе гребного винта назад; резкое торможение);

– разгон судна;

– рыскание судна на волнении;

– плавание в узкостях;

– столкновение с другим судном;

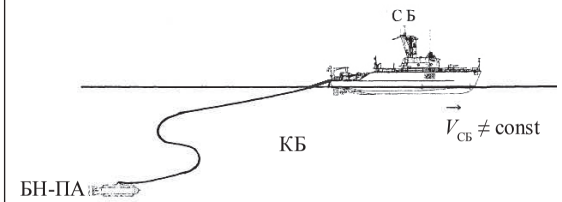
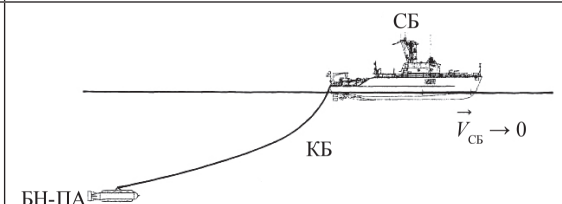
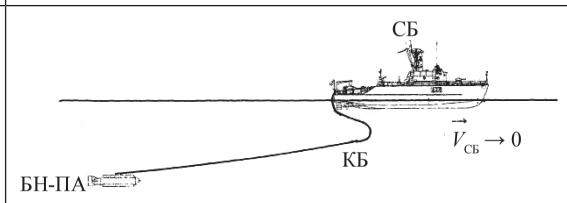
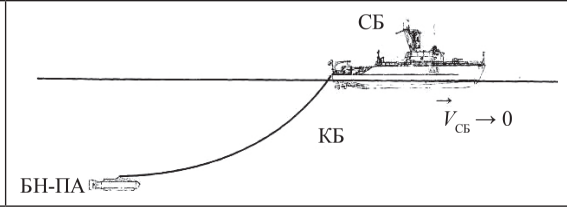
– посадка судна на мель.

При буксировке буксируемый объект мешает движению буксира (судна) и делает невозможным маневрирование в шторм в узкостях.

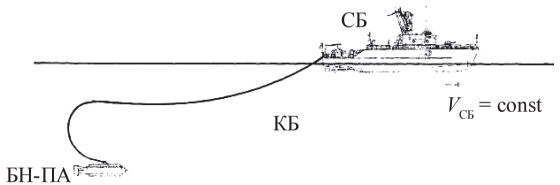
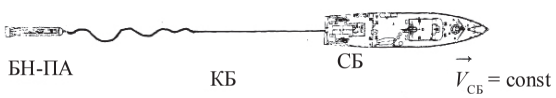
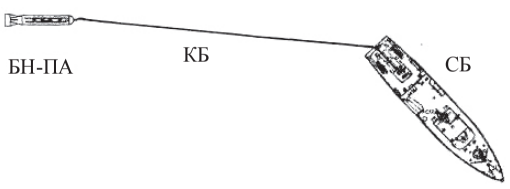
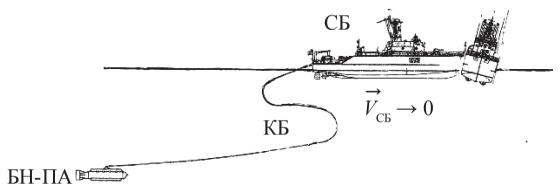
В табл. 4.5 приведены схемы названных режимов.

В дальнейшем при использовании математической модели динамики ГС МПС будут проведены расчёты для отдельных указанных режимов (см. пп. 4.3.1–4.3.6).

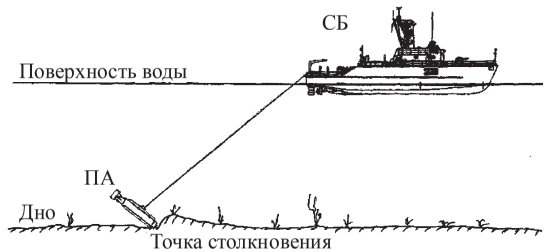
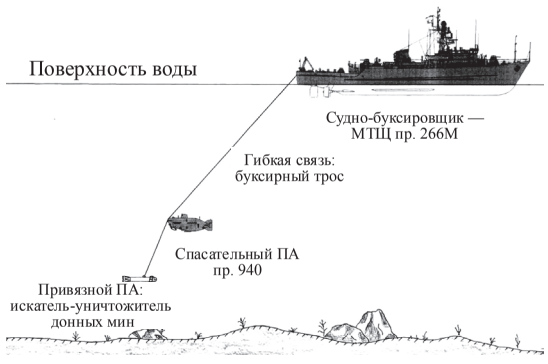
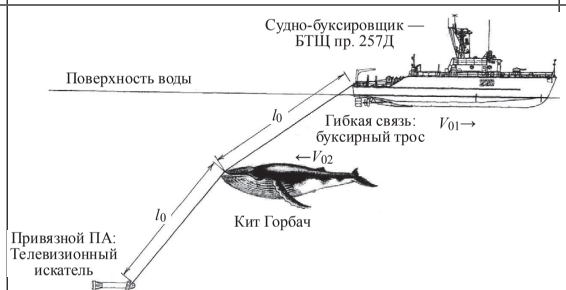
Таблица 4.5. Характеристика манёвров (движения) судна-буксировщика (СБ) и на примере подводной буксируемой системы (ПБС)

№	Вид манёвра СБ	Схема	Характеристика (описание) манёвра
1	*2*	*3*	*4*
1.	Неустановившееся движение ПБС (БН-ПА)		СБ движется с переменной скоростью, $V_{СБ} \neq 0$; БН-ПА буксируется за СБ с переменной скоростью, $V_{БН} > 0$, $V_{БН} \neq V_{СБ} \neq \text{const}$, кабель-буксир КБ не успевает выбираться лебёдкой и испытывает рывки, что вызывает дополнительные динамические нагрузки в нём и на барабане лебёдки
2.	Торможение плавное СБ с ПБС (свободное)		СБ начинает плавно тормозить, $V_{СБ} \to 0$, например перед осуществлением поворота; БН-ПА продолжает двигаться за СБ с уменьшающейся скоростью, $V_{БН} \to 0$, $V_{БН} \neq V_{СБ} \neq \text{const}$, кабель-буксир КБ плавно выбирается лебёдкой и наматывается на барабан лебёдки
3.	Резкое торможение СБ		СБ резко тормозит, $V_{СБ} \to 0$, например при неожиданной опасности (неожиданном вплытии ПЛ или подводном взрыве); БН-ПА продолжает двигаться за СБ с уменьшающейся скоростью, $V_{БН} \to 0$, $V_{БН} \neq V_{СБ} \neq \text{const}$, кабель-буксир КБ не успевает выбираться лебёдкой и продолжает двигаться по инерции (в зависимости от конструкции КБ он может принимать различную форму)
4.	Останов плавный СБ		СБ плавно тормозит и останавливается, $V_{СБ} \to 0$, например, перед выборкой БС; БН-ПА продолжает двигаться за СБ с уменьшающейся скоростью, $V_{БН} \to 0$, $V_{БН} \neq V_{СБ} \neq \text{const}$, кабель-буксир КБ плавно выбирается лебёдкой и наматывается на барабан

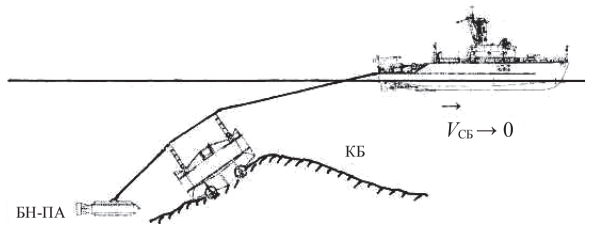
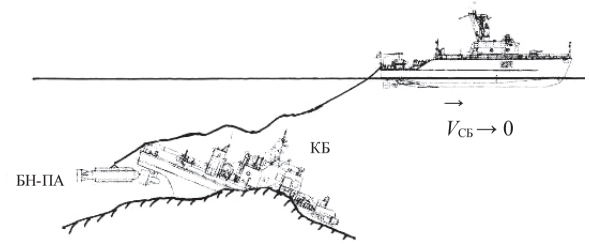
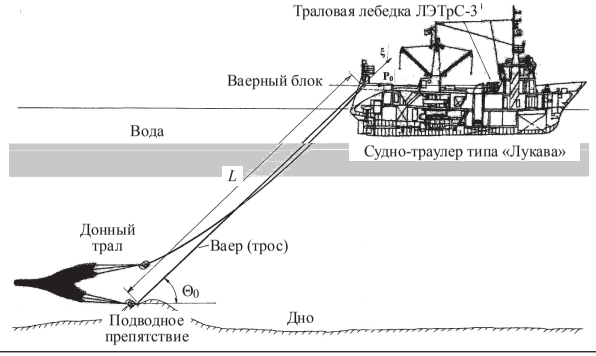
Продолжение таблицы 4.5

1	*2*	*3*	*4*
5.	Останов резкий СБ		СБ резко тормозит, $V_{СБ} \to 0$, продолжает двигаться по инерции и останавливается, например, при неожиданной опасности (подводном взрыве); БН-ПА продолжает двигаться за СБ с уменьшающейся скоростью $V_{БН} \to 0$, $V_{БН} \neq V_{СБ} \neq$ const, кабель-буксир КБ не успевает выбираться лебёдкой и продолжает двигаться по инерции (в зависимости от конструкции КБ он может принимать различную форму)
6.	Резкий ход СБ (разгон)		СБ резко даёт ход, $V_{СБ} \to V_{max}$, например, при неожиданной опасности за кормой СБ; БН-ПА также начинает резкое движение за СБ с увеличивающейся скоростью $V_{БН} \to V_{max}$, $V_{БН} \neq V_{СБ} \neq$ const, КБ резко натягивается, не успевает выбираться лебёдкой, слабина продолжает выбираться до рывка, динамические нагрузки в КБ резко возрастают, при этом КБ может быть оборван
7.	Поворот плавный СБ		СБ плавно тормозит и начинает поворот, $V_{СБ} \to V_{min}$, например, для изменения курса или поворота; БН-ПА продолжает двигаться за СБ с уменьшающейся скоростью $V_{БН} \to V_{min}$, $V_{БН} \neq V_{СБ} \neq$ const, кабель-буксир КБ плавно может плавно выбираться лебёдкой для уменьшения длины и наматываться на барабан, форма КБ меняется плавно и резкого рывка не происходит
8.	Поворот резкий СБ		СБ резко изменяет курс, $V_{СБ}$ = const или $V_{СБ} \to V_{max}$, например, при неожиданной опасности по курсу СБ; БН-ПА продолжает движение за СБ по инерции и не успевает изменить курс (если ПА несамоходный), скорость БН $V_{БН}$ = const или $V_{БН} \to V_{max}$, или $V_{БН} \neq V_{СБ} \neq$ const, кабель-буксир КБ резко натягивается и не успевает выбираться лебёдкой, происходит резкий рывок, динамические нагрузки в КБ резко возрастают, что может привести к обрыву КБ и повреждению барабана лебёдки
9.	Столкновение СБ с другим судном		СБ сталкивается с другим судном, происходит удар и скорость резко падает, $V_{СБ} \to 0$, БН-ПА продолжает двигаться за СБ с уменьшающейся скоростью $V_{БН} \to 0$, $V_{БН} \neq V_{СБ} \neq$ const, кабель-буксир КБ не успевает выбираться лебёдкой и продолжает двигаться по инерции (в зависимости от конструкции КБ он может принимать различную форму)

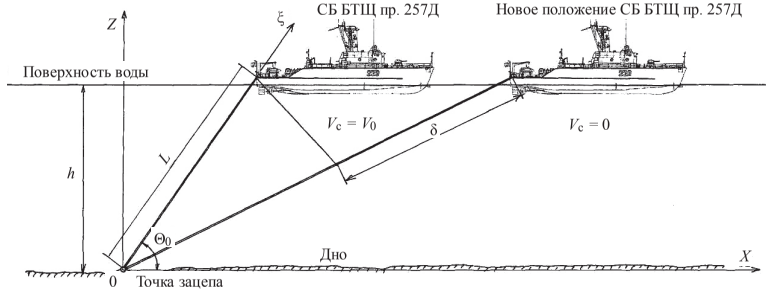
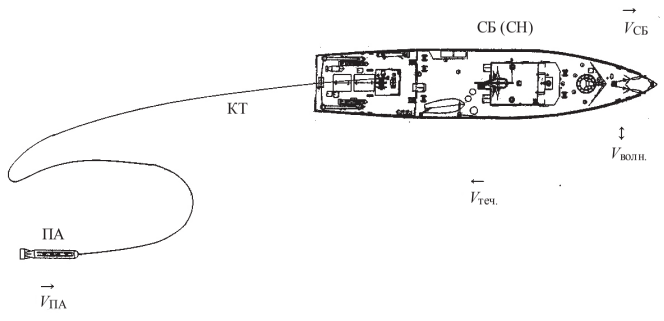
Продолжение таблицы 4.5

1	*2*	*3*	*4*
10.	Столкновение ПБС (БН-ПА) с подводным препятствием (дном)		БН-ПА ПБС сталкивается с дном, происходит удар ПА о препятствие на дне, скорость ПА резко падает, $V_{ПА} \to 0$, СБ продолжает двигаться с уменьшающейся скоростью $V_{СБ} \to 0$ по инерции до полного останова, в дальнейшем может наблюдаться его движение назад за счёт упругости КБ; кабель-буксир КБ натягивается, если вовремя не будет замечен зацеп ПА за подводное препятствие — это может привести к его разрыву
11.	Столкновение ПБС (БН-ПА) с подводным препятствием (другим ПА)		Система «СБ–КБ–БН-ПА» движется с постоянной скоростью V_{01}. СБ — МТЩ пр. 266М, БН-ПА — спасательный ПА пр. 1855. В некоторый момент времени (начало отсчёта ($t = 0$) по тросу ударяет тело массой m_2 (ППО), движущееся навстречу со скоростью V_{02}. Удар ППО происходит по КБ в произвольном месте. Несмотря на удар ППО по буксирному тросу, ПБС продолжает двигаться. Глубина ПБА уменьшается за счёт скольжения буксирного троса по ППО в результате продолжающегося движения ПБС. При этом глубина погружения ППО также может измениться. Возможны повреждения как буксирного троса, так и ПБА (повреждения корпуса, аппаратуры, находящейся на корпусе ПБА и т.п.) и встречного ППО. В случае сложных обводов корпуса ПБА и наличия большого количества навесного оборудования возможен зацеп буксирного троса за ПБА
12.	Столкновение ПБС (БН-ПА) с подводным препятствием (ММ)		При буксировке ПБО происходит столкновение ММ, например, кита-горбача, с буксирным тросом (удар по буксирному тросу КБ) ПБС. Система «СБ – БТ – БН-ПА» движется с постоянной скоростью V_0. БТ растянут силой натяжения $\boldsymbol{T}$ так, что его можно рассматривать как струну длиной $\boldsymbol{l}$ с закреплёнными концами. В некоторый момент времени, который принимаем за начало отсчёта ($t = 0$) по тросу ударяет тело массой m_2, движущееся со скоростью V_{02}. Удар происходит по середине буксирного троса

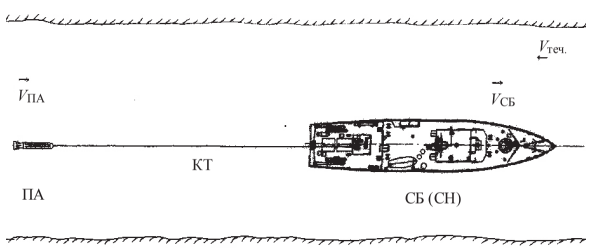
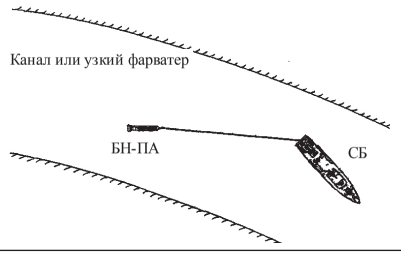
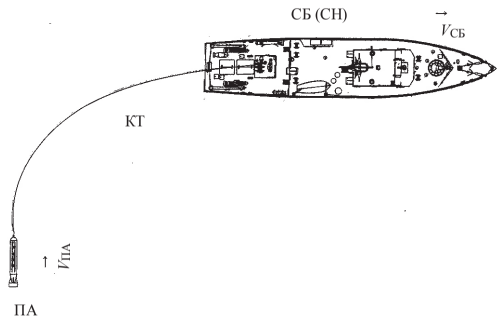
Продолжение таблицы 4.5

1	*2*	*3*	*4*
13.	Зацеп КБ за подводное препятствие		КБ СБ цепляется за подводное препятствие, скорость СБ резко уменьшается, $V_{СБ} \to 0$, происходит рывок в КБ, БН-ПА продолжает двигаться на оставшейся части КБ с уменьшающейся скоростью $V_{БН} \to 0$, кабель-буксир КБ резко натягивается до рывка, динамические нагрузки в КБ резко возрастают, при этом КБ может быть оборван, а барабан лебёдки повреждён
14.	Зацеп БН за подводное препятствие		БН СБ цепляется за подводное препятствие, скорость СБ резко уменьшается $V_{СБ} \to 0$ или СБ продолжает двигаться до полной выборки длины КБ, происходит рывок в КБ, КБ резко натягивается до рывка, динамические нагрузки в КБ резко возрастают, при этом КБ может быть оборван, а барабан лебёдки повреждён. Явления, аналогичные предыдущему случаю
15.	Зацеп траловой доски за подводное препятствие		При равномерном движении судна с тралом упор винта равен сопротивлению воды движению трала и судна. При зацепе траловой доски за дно сопротивление движению уменьшается. Полагаем, что в этот момент ($t = 0$) к судну приложено усилие, равное сопротивлению воды движению трала. Это усилие, в свою очередь, вызывает силу натяжения ваера в точке крепления к судну

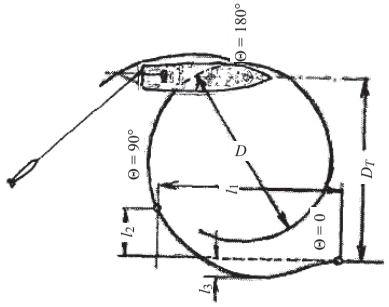
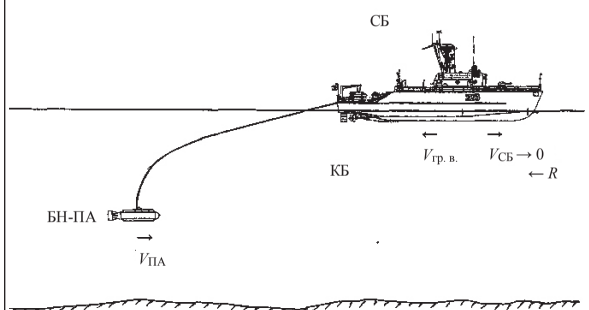
Продолжение таблицы 4.5

1	*2*	*3*	*4*
16.	Зацеп троса за подводное препятствие на дне		В результате зацепа нижнего конца ваера к верхнему концу прикладывается импульсная нагрузка движущимся судном-траулером. При глубоководном тралении импульсная нагрузка распространяется по ваеру как по волноводу со скоростью c_0 и достигает точки закрепления, где происходит отражение импульса (волны) нагружения. Этот момент является наиболее опасным с точки зрения достижения максимальной величины динамического натяжения ваера $T(t)$. В результате зацепа траловой доски за донное препятствие нижний конец ваера в момент ($t = 0$) оказывается закрепленным. Судно, имея в этот момент скорость V_0, продолжает двигаться по инерции, а также под действием упора винта P_0 которое ещё некоторое время не меняется
17.	Рыскание судна на волнении		Дополнительные виды качки представляют собой колебательные движения судна, возникающие за счет переменности знака внешних воздействий (рысканье — вращение около вертикальной оси), продольно-горизонтальная (поступательное движение вдоль продольной оси) и поперечно-горизонтальная (то же вдоль поперечной оси) качка. Возмущения качки буксировщика, передаваемые вдоль гибких связей на БН-ПА, способны вносить существенные искажения в регистрируемую информацию о характеристиках исследуемой среды

Продолжение таблицы 4.5

1	*2*	*3*	*4*
18.	Плавание и маневрирование СБ с ПБС в узкости		К узкостям относятся проливы, шхеры, устья рек, бухты и т. д. Встречаются узкости и искусственного характера (главным образом каналы). В некоторых узкостях судовождение осложняется незначительной шириной, в то время как глубина не ограничивает проход судов. Более сложной является проводка судов в узкостях, когда помимо незначительной ширины узкость характеризуется небольшими глубинами. При буксировке буксируемый объект мешает движению буксира (судна) и делает невозможным маневрирование в шторм в узкостях. В навигации и морской практике к узкостям относят судоходные водные районы, фарватер которых ограничен по ширине
19.	Маневрирование (поворот) СБ с ПБС в узкости		Прохождение изгибов узкости или канала следует совершать с особой осторожностью, сбавляя ход до малого и следуя курсом, параллельным очертаниям ближайшего берега. В изгибе не рекомендуется совершать резкую перекладку руля, так как это вызовет быстрое изменение курса и увеличение разности давлений по бортам в оконечностях судна, что, в свою очередь, ухудшит его управляемость. К плаванию в узкости относится и движение судна на акватории порта
20.	Маневрирование (поворот) СБ с ПБС в шторм		Поворот в узкостях должен совершаться так, чтобы судно следовало по оси фарватера параллельно изгибу канала. Безопасность плавания зависит от правильного управления судном. Судоводитель должен управлять судном в шторм таким образом, чтобы при имеющихся мореходных качествах судна обеспечить своими маневрами минимальную качку, наименьшую заливаемость, выбрать наиболее эффективную скорость и не допускать больших напряжений в корпусе судна. Сильная качка в шторм имеет многочисленные вредные последствия для судна

Окончание таблицы 4.5

1	*2*	*3*	*4*
21.	Циркуляция судна-буксировщика		СБ резко изменяет курс и осуществляет циркуляцию, которая характеризуется падением скорости при неизменной мощности главных двигателей и креном СБ $V_{СБ} \rightarrow V_{min}$, например, при неожиданной опасности по курсу СБ или изменении курса; БН-ПА продолжает движение за СБ по инерции и не успевает изменить курс (если ПА несамоходный), скорость БН $V_{БН}$ = const или $V_{БН} \rightarrow V_{max}$, или $V_{БН} \neq V_{СБ} \neq$ const, кабель-буксир КБ резко натягивается и не успевает выбираться лебёдкой, происходит резкий рывок, динамические нагрузки в КБ резко возрастают, что может привести к обрыву КБ и повреждению барабана лебёдки, за счёт центробежных сил вылет БН на КБ может измениться на противоположный
22.	Свободное торможение СБ с ПБС при работе гребного винта назад		Этот случай на практике встречается гораздо чаще, чем свободное торможение. При всех швартовных операциях, при расхождении судов, маневрировании в узкостях и т. п. для сокращения тормозного пути и времени торможения используют работу машины на задний ход. При опасном сближении судов в местах интенсивного судоходства возможно изменение режима работы машины со среднего и даже полного хода вперед на полный ход назад и т. д. Общим для всевозможных вариантов будет наличие двух сил, действием которых погашается кинетическая энергия движущегося судна. Первой силой, как и при свободном торможении, явится сила сопротивления воды R. Второй будет сила упора винта P, работающего на задний ход. Изменение режима работы винта на задний ход меняет упор винта P, а следовательно, и тормозные характеристики судна

Принятые в таблице сокращения:

БН — буксируемый носитель;
БНПА — буксируемый необитаемый ПА;
БПА — буксируемый ПА;
БС — буксируемая система;
ГД — главный двигатель;
ГК — грузонесущий кабель;
ГС — гибкая связь;
ЗО — затонувший объект;
КБ — кабель-буксир;
КТ — кабель-трос;
МПС — морская привязная система;
ПА — подводный аппарат;
ПБС — подводная буксируемся система;
ММ — морское млекопитающее;
ПП — подводное препятствие;
СБ — судно-буксировщик;
СН — судно-носитель.

4.3.1. Аварийный зацеп гибкой связи за подводное препятствие

Вопросы зацепа отдельных элементов траловых систем, таких как ваера и траловые доски, рассматривались в [387, 403, 419], элементов ПБС — в [343]. Вопросы определения максимальных нагрузок в элементах МПС рассмотрены в [423]. Характер нагрузок на элементы тралового комплекса при аварийной ситуации меняется очень существенно, они могут увеличиваться в несколько раз. Естественно, такие режимы работы необходимо предусматривать при проектировании элементов МПС.

В качестве ваеров на больших морозильных рыболовных траулерах (БМРТ) наиболее часто применялись стальные канаты диаметром 25–26,5 мм ГОСТ 2688-55, ГОСТ 3066-55, ГОСТ 3067-55, ГОСТ 3070-55, ГОСТ 3077-55, ГОСТ 7665-55 и ГОСТ 7666-55 [189, 285]. Опыт эксплуатации канатов показывает, что в большинстве случаев конструкции не удовлетворяют требованиям: при спуске и подъеме трала ваера раскручиваются или закручиваются, имеют большое остаточное удлинение, большие различия в длинах левого и правого ваеров, существенный механический износ и коррозионное разрушение. Различие в длинах иногда доходит до 10–15 м, что вызывает перекос трала и снижает уловистость рыбы [285].

Как отмечается в [313, с. 238], условия эксплуатации канатов в качестве ваеров следующие:

– ваера подвергаются многократному изгибу на блоках, диаметр которых $D_в$ = 300–350 мм, диаметр ваера $d_в$ = 25 мм, отношение $D_в/d_в$ = 12–14, т. е. составляет очень малую величину;

– ваерные блоки имеют слишком большой диаметр желоба $D_ж$, доходящий до трех диаметров ваера, следовательно, жёлоб можно считать практически плоским;

– ваера подвергаются раздавливанию на барабанах лебёдки в связи с многослойной навивкой (до 15–20 слоёв);

– при проводке ваеров через ваерные блоки возникают значительные углы девиации их (до 30–45°);

– ваера эксплуатируются в жестких условиях коррозионной усталости, так как при этом подвергаются воздействию переменной среды: воздух – морская вода;

– ваера испытывают динамические нагрузки при волнении на море и особенно при задевании трала за грунт;

– ваера подвергаются значительному механическому износу вследствие трения на ваерных блоках и о морское дно.

Средний срок эксплуатации ваеров согласно нормам износа, действующим в траловом флоте, для БМРТ установлен в 2000 ч траления. Проведенные наблюдения на БМРТ Мурманского тралового флота показали, что ваера выдерживают лишь 900–1200 ч траления, только отдельные ваера превосходят норму — 3635 ч [313]. Следует отметить, что ваера одного и того же БМРТ имеют различные сроки эксплуатации — от 200 до 4000 ч траления, что свидетельствует о нестацио-

нарных условиях их эксплуатации [285, 313]. Число спусков-подъемов трала в месяц в среднем составляет 160–200. Следовательно, за весь срок службы (2 рейса, 12 месяцев) ваер совершает 2000–2400 спусков-подъемов. За один спуск-подъем ваер подвергается пятикратному перегибу на блоках и барабане лебедки, изгибаясь и выравниваясь. Таким образом, за весь срок службы ваер выдерживает 10–12 тыс. перегибов примерно [313].

Подобные задачи исследований траловых комплексов и их элементов уже рассматривались автором и были опубликованы в работах [382, 384, 387, 388, 390].

Исследования динамики, нагрузок траловых комплексов и их режимов работы проводились разными исследователями [81, 92, 96, 97, 116, 121, 128, 327, 328, 365]. Вместе с тем, вопросы зацепа элементов тралового комплекса за дно или препятствия на дне (ваеров, траловых досок, трала) практически не рассматривались исследователями, кроме всего прочего в литературе отсутствуют данные об их аварийных режимах работы.

В связи с этим возникает потребность исследования аварийных режимов работы тралового комплекса, создания соответствующих математических моделей для проведения таких исследований. Такой вопрос рассматривался на Всеукраинской научно-практической конференции «Морские технологии: Проблемы и решения – 2011», г. Керчь, 18–22 апреля 2011 г., секция «Современные проблемы промышленного рыболовства и промысловой техники», тема доклада: «Зацеп буксируемого объекта за препятствие на дне на примере зацепа траловой доски при глубоководном тралении» [387].

При равномерном движении судна с тралом упор винта равен сопротивлению воды движению трала и судна. При зацепе траловой доски за дно сопротивление движению уменьшается (рис. 4.2) [387]. Полагаем, что в этот момент ($t = 0$) к судну приложено усилие, равное сопротивлению воды движению трала. Это усилие, в свою очередь, вызывает силу натяжения ваера в точке крепления к судну:

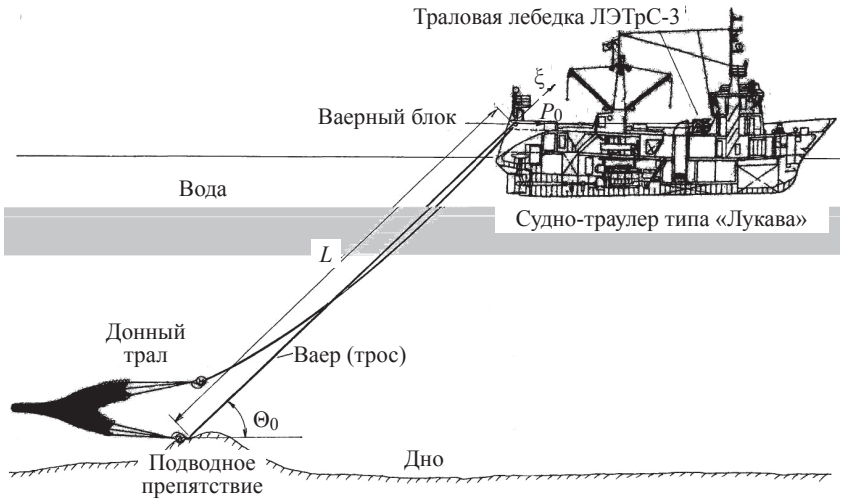


Рис. 4.2. Схема зацепа трала (траловой доски) за донное препятствие

$$T_0 = P_0 \cos\Theta_0, \tag{4.1}$$

где Θ_0 — угол, образованный нитью ваера с плоскостью дна;

P_0 — горизонтальная составляющая усилия в ваере.

Считаем также, что некоторое время величина P_0, а следовательно, и T_0, будет постоянной. Динамика ваера может быть описана краевой задачей

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a_0 \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2}, \tag{4.2}$$

где t — время, $t \geq 0$;

ξ — линейная координата, $0 < \xi < l$;

a_0 — скорость распространения возмущений по ваеру, $a_0 = \sqrt{E/\rho_0}$;

E — модуль упругости материала ваера (модуль Юнга);

ρ_0 — плотность материала ваера;

u — продольная деформация растяжения ваера.

Граничные условия имеют вид:

$$\xi = 0,\ u = 0; \tag{4.3}$$

$$\xi = L,\ \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{T_0}{ES}. \tag{4.4}$$

Начальные условия принимаем нулевыми:

$$t = 0,\ u = \frac{\partial u}{\partial t} = 0. \tag{4.5}$$

Уравнение (4.2) с учётом граничного условия (4.4) можно представить в виде

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{T_0}{m_0}\delta(\xi - L), \tag{4.6}$$

где $\delta(\xi - L)$ — дельта-функция Дирака;

m_0 — масса ваера на единицу длины.

Заметим, что

$$M_0 = Lm_0 = \rho_0 SL, \tag{4.7}$$

где M_0 — масса ваера;

S — площадь поперечного сечения ваера.

Дельта-функция обладает следующими свойствами [128]:

$$\delta(\xi - \xi_0) = \begin{cases} 0, \text{ при } \begin{cases} \xi \leq \xi_0, \\ \xi \leq (\xi_0 + \Delta\xi), \end{cases} \\ 1/\xi, \text{ при } \xi \leq \xi \leq (\xi_0 + \Delta\xi), \end{cases} \tag{4.8}$$

где $\Delta\xi \to 0$.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\xi - \xi_0)d\xi = 1; \tag{4.9}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(\xi)\delta(\xi - \xi_0)d\xi = \varphi(\xi_0). \tag{4.10}$$

Как видно из (4.8), (4.9), (4.10), дельта-функция $\delta(\xi-\xi_0)$ отлична от нуля на бесконечно малом интервале $\Delta\xi$, поэтому пределы в интервалах (4.9–4.10) можно заменить на конечные, т. е.

$$\int_{0}^{L} \delta(\xi - \xi_0)d\xi = 1;$$

$$\int_{0}^{L} \varphi(\xi)\delta(\xi - \xi_0)d\xi = \varphi(\xi_0).$$

С учётом данного обстоятельства дельта-функцию разложим в ряд Фурье по собственным функциям краевой задачи [182]:

$$\delta(\xi - \xi_0) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin\frac{\pi n\xi}{2L},$$

где коэффициенты ряда c_n определяются как

$$c_n = \frac{2}{L}\int_0^L \delta(\xi - \xi_0)\sin\frac{\pi n\xi}{2L}d\xi = \frac{2}{L}\sin\frac{\pi n\xi_0}{2L}.$$

В данном конкретном случае, принимая $\xi_0 = L$, получаем

$$c_n = \frac{2}{L}\sin\frac{\pi n}{2} = \frac{2}{L}(-1)^{\frac{n-1}{2}}, (n = 1, 2, 5, \ldots).$$

Учитывая, что n принимает нечётные значения, полагаем $n = 2k + 1$, где $k = 0, 1, 2, 3,...$ Тогда

$$\delta(\xi - \xi_0) = \frac{2}{L}\sum_{k=0}^{\infty}(-1)^k \sin\frac{\pi(2k+1)\xi}{2L}. \tag{4.11}$$

С учётом (4.11) уравнение (4.6) принимает вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a_0^2\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{2T_0}{Lm_0}\sum_{k=0}^{\infty}(-1)^k \sin\frac{\pi(2k+1)\xi}{2L}. \tag{4.12}$$

Решение уравнения (4.12) при учёте граничного условия (4.3) получим в виде

$$u(\xi,t)=\sum_{k=0}^{\infty}u_k(t)\cdot\sin\frac{\pi(2k+1)\xi}{2L}. \tag{4.13}$$

Подставляем решение (4.13) в уравнение (4.12) и получаем

$$\frac{\partial^2 u_k(t)}{\partial t^2}+\left(a_0\cdot\frac{\pi(2k+1)\xi}{2L}\right)^2\cdot u_k(t)=\frac{2T_0}{Lm_0}(-1)^k. \tag{4.14}$$

Из начального условия (4.5) следует, что $u_k(0) = 0$. Тогда решение (4.14) находим в виде

$$u_k(t)=\frac{8T_0L^2}{Lm_0(\pi a_0k)^2}\cdot\left[1-\cos\frac{\pi(2k+1)a_0t}{2L}\right](-1)^k. \tag{4.15}$$

Подставляя (4.15) в решение (4.13), получим

$$u_k(t)=\frac{8T_0L}{m_0\pi^2a_0k^2}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k}{(2k+1)^2}\cdot\sin\frac{\pi(2k+1)\xi}{2L}\cdot\left[1-\cos\frac{\pi(2k+1)a_0t}{2L}\right]. \tag{4.16}$$

Заметим, что $\frac{8T_0L}{m_0\pi^2a_0k^2}=\frac{8T_0L}{\pi_2ES}$, т.к. $a_0^2=E/\rho$.

Усилие в ваере найдём, воспользовавшись формулой $T(\xi,t)=ES\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial\xi}$:

$$T(\xi,t)=T_0\frac{4}{\pi}\cdot\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k}{(2k+1)}\cdot\cos\frac{\pi(2k+1)\xi}{2L}\cdot\left(1-\cos\frac{\pi(2k+1)a_0t}{2L}\right). \tag{4.17}$$

Как видно из (4.17), максимальное усилие в ваере будет достигнуто при $\xi = 0$. Тогда получим

$$\max T=T(0,t)=T_0\frac{4}{\pi}\cdot\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k}{(2k+1)}\cdot\left[1-\cos\frac{\pi(2k+1)a_0t}{2L}\right]. \tag{4.18}$$

Найдём суммы рядов [175]:

$$\frac{4}{\pi}\cdot\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k}{(2k+1)}=1-\frac{4}{\pi}\cdot\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k}{(2k=1)}\cdot\left(\cos\frac{\pi(2k+1)}{2}\cdot\tau\right)=1 \text{ при } (-\pi<\tau<\pi),$$

где $\tau=\frac{a_0t}{L}$.

Таким образом, функция $\max T = 2T_0$ при $\tau = 0$.

Максимальное растяжение ваера из (4.18) достигается при $\xi = L$ в моменты времени $t_1=\frac{2L}{a_0}$:

$$u_{\max}=\frac{16TL_0}{ES\pi^2}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{(2k+1)}. \tag{4.19}$$

Согласно [175]

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)} = \frac{\pi^2}{8}.$$

Тогда

$$u_{\max} = \frac{2T_0 L}{ES}. \tag{4.20}$$

Как видим, при внезапном приложении нагрузки в месте крепления ваера к судну (траулеру) растяжение ваера вдвое больше, чем при статическом нагружении силой T_0.

В данном случае рассмотрен упрощённый подход решения задачи определения максимальних значений усилий в ваере и его растяжения при зацепе трала за дно при глубоководном тралении. Аналитическое решение получено в простом виде. Необходимо отметить, что при зацепе траловой доски за препятствие не учитывается демпфирование троса о воду и внутреннее трение в тросе.

При буксировке судном подводного привязного объекта, например, трала, возможен случай жёсткого зацепа последнего за донное препятствие [74]. В [384] рассмотрена математическая модель мягкого зацепа при небольшой скорости буксировки трала и эластичном ваере. В случае возрастания буксировочной скорости (свыше 6 уз.) и большой длине буксирных тросов (до 2000–4000 м) продольные деформации ваеров имеют волновой характер, а продольные волны носят импульсный характер. При этом возникающие в тросе нагрузки могут достигать критических величин. Такая математическая модель постановочного плана выполнена в [403].

Рассмотрим математическую модель системы «судно–трал» при «жёстком» зацепе глубоководного трала за донное препятствие [419]. Однако, может иметь место случай так называемого «жёсткого зацепа», когда упругие свойства ваера ограничены. Предлагается решение данной задачи для «жёсткого зацепа». Рассмотрим математическую модель рывка судна при «мертвом» зацепе траловой доски за донное препятствие. Зацеп траловой доски исключает упругое демпфирование трала, и нагрузка в этом случае возникает только в самом ваере. Полагаем, что судно-траулер вместе с донным тралом движется со скоростью V_0. Глубина траления (глубина водоема) составляет h, длина вытравленной части ваера L (рис. 4.3). В результате зацепа нижнего конца ваера к верхнему концу прикладывается импульсная нагрузка движущимся судном-траулером.

При глубоководном тралении (h = 2000–4000 м) импульсная нагрузка распространяется по ваеру как по волноводу со скоростью c_0 и достигает точки закрепления, где происходит отражение импульса (волны) нагружения. Покажем, что этот момент является наиболее опасным с точки зрения достижения максимальной величины динамического натяжения ваера $T(t)$. При зацепе траловой доски за донное препятствие нижний конец ваера в момент t = 0 оказывается закрепленным. Судно, имея в этот момент скорость V_0, продолжает двигаться по инерции, а также под действием упора винта P_0, которое ещё некоторое время не меняется. Определим возникшее напряженное состояния ваера.

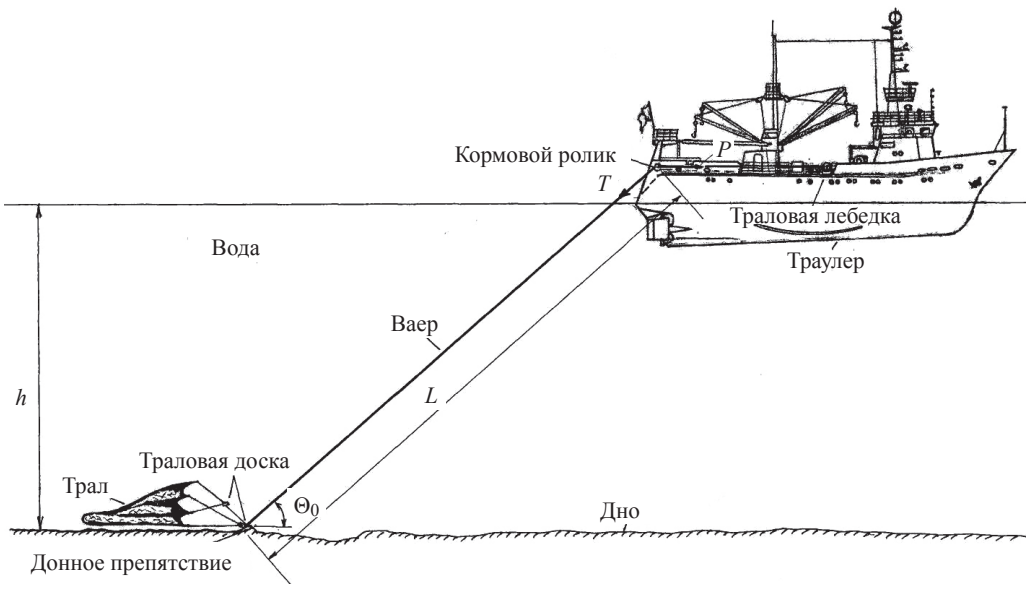


Рис. 4.3. Схема зацепа траловой доски трала за донное препятствие

Для решения задачи выберем две системы координат. Система *oxz*, где ось *ox* направлена по поверхности воды в сторону движения судна, а ось *oz* направлена в сторону дна и пересекает плоскость дна в точке O_1. Ось $O_1\xi$ направим в сторону судна. При этом ось $O_1\xi$ совпадает с линией ваера (рис. 4.4).

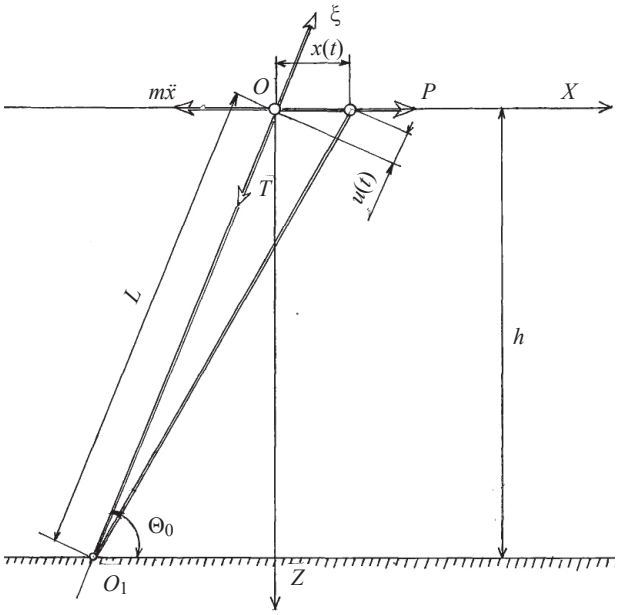


Рис. 4.4. Схема действия сил в системе «судно – глубоководный трал» при донном зацепе трала

Пусть ваер представляет собой прямолинейный отрезок длины L, который составляет с плоскостью дна (и поверхностью воды) угол θ_0, так что

$$\cos\theta_0 = \sqrt{L^2 - h^2}\Big/ L = \sqrt{1 - \left(h/L\right)^2}\ .$$

Напряженно-деформируемое состояние ваера описывается волновым уравнением

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} - \frac{1}{c_0{}^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \tag{4.21}$$

где u — продольная деформация растяжения ваера;

t — время ($t \geq 0$);

ξ — координата ($0 \leq \xi \leq L$);

c_0 – скорость распространения волн нагружения по тросу, как по волноводу.

Решение уравнения (4.21) в виде $u = u(\xi, t)$ должно удовлетворять граничным и начальным условиям. Граничное условие в точке закрепления ($\xi = 0$) заключается в том, что деформация в этой точке равна нулю, т.е.

$$\xi = 0: \qquad u(0,t) = 0. \tag{4.22}$$

В точке крепления ваера на судне величина деформации связана с величиной перемещения судна с момента $t = 0$:

$$\xi = L: \qquad M\frac{d^2 x}{dt^2} + F(x,t) = P_0(t), \tag{4.23}$$

где dx — смещение судна ($dx = d\xi\cos\theta_0$);

$P_0(t)$ — упор винта;

$F(x,t)$ — действие трала на судно;

M — суммарная масса, определяемая в свою очередь как

$$M = M_0 + M_1, \tag{4.24}$$

где M_0 — масса судна;

M_1 — присоединённая масса воды при продольном движении судна.

Заметим, что

$$F(x,t) = \frac{T(\xi,t)}{\cos\theta_0}\bigg|_{\xi=L},\ \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\xi}\bigg|_{\xi=L}\frac{du}{dt} = \frac{\dot{u}}{\cos\theta_0}, \tag{4.25}$$

где $T(L,t)$ — натяжение троса в точке крепления ваера к судну.

Начальные условия имеют вид

$$t = 0: \begin{cases} u = \dfrac{\partial u}{\partial t} = 0, & \text{при } 0 \leq \xi < \mathrm{L}; \\ \dfrac{\partial u}{\partial t} = V_0\delta(\xi - L), & \text{при } \xi = \mathrm{L}, \end{cases} \tag{4.26}$$

где $\delta(\xi - L)$ — дельта-функция Дирака;

V_0 — скорость движения судна при $t = 0$.

В свою очередь, величина натяжения троса и скорость волн определяется как

$$T(\xi,t)=(ES)_{mp.}\frac{\partial u}{\partial \xi},\ C_0=\sqrt{E/\rho}, \tag{4.27}$$

где E — модуль упругости материала троса (модуль Юнга);

S — площадь поперечного сечения троса

$$S=\frac{\pi d^2}{4}, \tag{4.28}$$

где d — диаметр троса.

Далее полагаем, что $P_0(t) = P_0 = \text{const}$. В случае неоднородного по сечению троса (например, из металлических свивок и растительного волокна) определение $(ES)_{тр}$ является самостоятельной задачей [182].

Учитывая соотношения (4.23), (4.25), (4.27), граничное условие (4.23) представим в виде

$$\xi=L:\qquad \frac{\partial u}{\partial \xi}=\frac{1}{ES}\left[\frac{P_0}{\cos\theta_0}-M_\theta\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right], \tag{4.29}$$

где $M_\theta = M\cos^2\theta_0$.

Таким образом, начально-краевая волновая задача нагружения ваера принимает вид:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2}-\frac{1}{C_0}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=0;\ 0\le\xi\le L\\
&\xi=0: u=0;\\
&\xi=L:\frac{\partial u}{\partial \xi}=\frac{1}{ES}\left[\frac{P_0}{\cos\theta_0}-M_\theta\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right];\\
&t=0:\begin{cases}u(\xi,0)=\dfrac{\partial u(\xi,0)}{\partial t}, \text{ при } 0\le\xi\le L\\ \dfrac{\partial u}{\partial t}(\xi,0)=V_0\delta(\xi-L), \text{ при } \xi=L\end{cases}\\
&T(\xi,t)=ES\frac{\partial u}{\partial \xi}.
\end{aligned}\right\}, \tag{4.30}$$

Для решения краевой задачи (10) воспользуемся преобразованием Лапласа по времени t [182]:

$$u^L(\xi,p)=\int_0^\infty e^{-pt}u(\xi,t)dt, \tag{4.31}$$

где ρ — параметр преобразования;

u^L — трансформанта преобразования;

u — оригинал.

В области изображений (в трансформантах) по (4.31) краевая задача (4.30) примет вид:

$$\frac{\partial^2 u^2}{\partial \xi^2} - \left(\frac{p}{c_0}\right)^2 u^2 = 0; \tag{4.32}$$

$$u^L(0,p) = 0 \text{ при } \xi = 0; \tag{4.33}$$

$$\frac{du^L(p,\xi)}{d\xi} = \frac{1}{(ES)} \cdot \left[\frac{1}{p}\left(\frac{P_0}{\cos\theta_0}\right) - M_\theta u^L(p,\xi)p^2 + M_\theta V_0\right] \text{ при } \xi = L. \tag{4.34}$$

Уравнение (4.34) перепишем в виде

$$\frac{du^L}{d\xi} + \frac{M_\theta p^2}{(ES)} u^L = \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{P_0}{\cos\theta_0}\right) \cdot \frac{1}{ES} + \frac{M_\theta V_0}{ES} p, \text{ где } \xi = L. \tag{4.35}$$

Как показано в [180], наиболее опасными являются первые рывки троса, что соответствует малым значениям времени t, а значит — большим значениям параметра P [128]. Поэтому (4.35) можно записать в виде

$$\frac{du^2}{d\xi} + \frac{M_\theta}{ES} u^L \rho^2 = \frac{M_\theta}{ES}, \text{ где } \xi = L. \tag{4.36}$$

Решение задачи (4.32), (4.33), (4.36) приведено в [182]. В частности, для динамического усилия в тросе в точке $\xi = 0$ решение для первых двух рывков имеет вид

$$T(0,t) = 2(ES) \cdot \frac{V_0}{c_0} \cdot f(t), \tag{4.37}$$

где $f(t) = \begin{cases} 0, \text{ при } 0 \le t \le t_0; \\ e^{-a(t-t_0)}, \text{ при } t_0 \le t \le 3t_0; \\ e^{-a(t-t_0)} + [1-2a(t-3t_0)] \cdot e^{-a(t-3t_0)} \cdot 1_+(t-3t_0), \text{ при } 3t_0 \le t \le 5t_0; \end{cases}$

$t_0 = L/c_0$; $\quad a = ES/(M_\theta c_0)$.

Выражение (4.37) запишем в безразмерном виде

$$\overline{T}(0,\tau) = \frac{T(0,t)}{2(ES)\frac{V_0}{c_0}} = f(\tau), \tag{4.38}$$

где $f(t) = \begin{cases} 0, \text{ при } 0 \le \tau \le t_0; \\ e^{-\mu(\tau-1)}, \text{ при } 1 \le \tau \le 3; \\ e^{-\mu(\tau-1)} + [1 - 2\mu(\tau-3)] \cdot e^{-\mu(\tau-3)} \cdot 1_+(\tau-3), \text{ при } 3 \le \tau \le 5; \end{cases}$ (4.39)

$\tau = t/t_0$; $\mu = at_0 = \dfrac{m}{M_\theta}$; $m = \rho_0 LS$ — масса вытравленного троса (ваера).

На рис 4.5 приведены результаты расчёта по формуле (4.39).

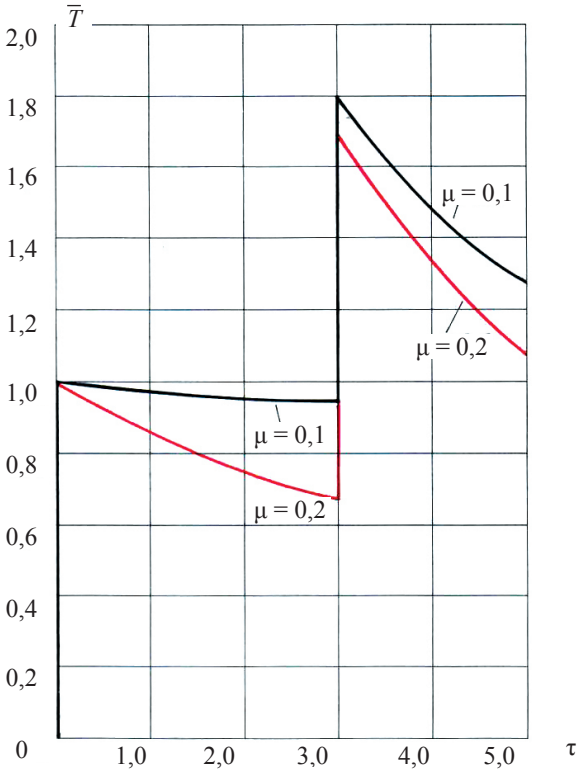


Рис. 4.5. Результаты расчёта функции $f(\tau)$ по формуле (4.39):
чёрный цвет соответствует случаю μ = 0,1, красный цвет — случаю μ = 0,2

Как видно из рис. 4.5, амплитуда усилия в тросе второго рывка больше, чем первого. С ростом величины μ амплитуда убывает. Следует отметить, что амплитуда при втором рывке, по-видимому, в модели выше, чем в действительности. Это объясняется тем, что в предлагаемой модели не учитываются факторы демпфирования как в самом тросе, так и при движении судна. В данном примере выполнена математическая постановка задачи «жёсткого» зацепа подводного буксируемого объекта за дно. Получено выражение для усилия в тросе для двух первых рывков. Напряженно-деформируемое состояние ваера описано в рамках волновой модели прямолинейного отрезка растяжимой упругой нити. Найдено математическое выражение для усилия в ваере.

Наиболее экстремальные условия для БС чаще всего возникают при проведении спуско-подъемных операций, когда буксируемый носитель (БН) подвергается воздействиям попутного потока, струй от гребных винтов, морского волнения в достаточной близости от корпуса судна [7, с. 33]. При этом возможны повреждения БН при ударах о корпус судна, а также повреждения кабель-буксиров в результате многократных перегибов на роликах и других элементах спуско-подъёмных устройств (СПУ).

Прочность элементов конструкции БС является важнейшей эксплуатационной характеристикой, одним из основных критериев, определяющих выбор конструктивной и гидродинамической компоновки БС, режимов постановки-выборки и эксплуатации [16, 176]. При проектировании БС, как и при проектировании других сложных систем, необходимо установить минимально необходимое значение коэффициента запаса прочности [11].

Для буксирных тросов прочность также является одной из важнейших их характеристик. Прочность троса зависит от материала, из которого он изготовлен, его качества и колеблется в широких пределах. Опыт показывает, что тонкие тросы в отличие от толстых имеют прочность, равномерную по всей длине [36, с. 20]. Как считает С. Свенсон [199], причина в том, что чем толще трос, тем сложнее равномерно распределить нагрузку на все его пряди.

Канаты представляют собой систему изогнутых волокон, проволок, нитей, прядей, взаимодействие между которыми проявляется при растяжении нелинейно и односторонне (с потерями энергии). Деформация каната при этом зависит от способа приложения нагрузки, времени выдержки связи под нагрузкой, числа циклов нагружения. С. Г. Киров [202, с. 271] отмечает, что работа троса на вращающемся барабане или блоке принципиально меняет критерии оценки прочности и подход к расчёту. Периодически изменяющиеся изгибные напряжения приводят к необходимости учитывать усталостные явления, значение которых возрастает, если учесть, что в месте соприкосновения проволочек возникает сложное напряжённое состояние. В этом случае критической считается нагрузка, при которой канат выдерживает до разрушения только 100 повторных изгибов.

Работа гибких связей МПС и ПБС в процессе эксплуатации характеризуется следующими условиями [313]:

1) канаты подвергаются действию резких перепадов температур воздуха (от –40°С до 50°С) и морской воды (от –2°С до +30°С);

2) канаты подвергаются многократному изгибу на блоках, диаметр которых $D_Б$ = 200–500 мм и более;

3) блоки имеют слишком большой диаметр желоба $D_ж$, доходящий до трех и более диаметров каната, следовательно, жёлоб можно считать практически плоским;

4) канат на барабанах буксирных лебёдок наматывается в 15–20 слоёв;

5) канат подвергается раздавливанию на барабанах лебёдки в связи с многослойной навивкой (до 15–20 слоёв);

6) при проводке каната через блоки возникают значительные углы девиации (до 30–45°);

7) канат эксплуатируется в жестких условиях коррозионной усталости, так как при этом подвергается воздействию переменной среды: воздух – морская вода;

8) канаты испытывают динамические нагрузки при волнении на море и особенно при задевании за грунт, подводные препятствия;

9) канаты подвергаются значительному механическому износу вследствие трения на блоках и о морское дно.

При этом в процессе длительной эксплуатации МПС и ПБС:

– канаты получали большое остаточное удлинение (до 15–20 м и больше на 1000 м длины);

– неравномерная укладка канатов на барабаны лебёдок и вьюшек приводила к вырыванию отдельных проволок и целых прядей из тела каната;

– происходило выдавливание органического сердечника по всей длине каната;

– происходило разрушение реборд барабана;

– происходило интенсивное изнашивание проволок каната вследствие механического истирания на блоках и роульсах, в клюзах и на кнехтах, что приводило к обрыву каната, особенно при зацепе за подводное препятствие, и в конечном итоге к потере БН, дорогостоящего оборудования;

– для кабель-тросов (КТ) происходило вытягивание жил электрических проводов, что вело к изменению их сопротивления, а при проникновении воды в местах разрыва — к короткому замыканию и выходу из строя.

Как отмечается в [14], особую актуальность приобретают вопросы обеспечения прочности БС в связи с применением в морском приборостроении волоконной оптики. Определение напряжения в натянутом и изогнутом тросе связано с большими трудностями. Наиболее точные и надёжные результаты получают при использовании энергетического метода. Расчёт прочности троса выполняют по критическому усилию, приводящему к его разрыву на неподвижном барабане [201, с. 270]:

$$T_{\text{кр}} = F_{\text{с}}\left(\sigma_B - \Theta E\frac{\delta}{D}\right)\varepsilon\cdot 10^{-6}, \tag{4.40}$$

где $F_{\text{с}}$ — площадь сечения проволочек, мм^2;

ε — коэффициент свивки, представляющий отношение разрывного усилия троса к суммарному сопротивлению всех проволок;

σ_B — предел прочности проволочек, Н/м^2.

На участках, где канат охватывает неподвижную цилиндрическую поверхность, его прочность определяется суммарным воздействием растягивающих и изгибающих усилий. Для стального каната диаметром d, охватывающего цилиндр диаметром D, разрывное усилие ориентировочно может бать найдено по приближённой формуле Рело-Баха [175, с. 48]:

$$T_{\text{кр}} = \alpha F\left(\sigma_B - \beta E\frac{d}{D}\right), \tag{4.41}$$

где F — площадь сечения проволочек, мм^2;

E — модуль упругости проволоки;

α, β — численные коэффициенты, зависят от угла свивки и других параметров каната.

Допускаемое усилие при огибании неподвижного барабана [202, с. 270]:

$$T = \frac{T_{кр}}{n}, \tag{4.42}$$

где n — запас прочности, учитывающий степень ответственности конструкции при работе.

Запас прочности канатов принято определять относительно разрывной нагрузки в целом. При выборе запасов прочности канатов, как и любых конструктивных элементов устройств, учитывают степень достоверности расчетных схем, стабильность свойств материала, ответственность устройства [172, с. 70].

Значения коэффициента запаса прочности n зависят от допущений, положенных в основу расчетной методики. Уменьшаются запасы прочности при учете динамических нагрузок, что связано с большей достоверностью расчетных схем. Для буксирных канатов запасы прочности относят к тяге на гаке P: когда $P \leq 98{,}1$ кН, принимают $n = 5$, когда $P \leq 294$ кН, $n = 3$ [201, с. 72]. При расчёте канатов СПУ в статическом варианте расчёта принимают $n = 6$, в динамическом $n = 2{,}5$ [202, с. 49].

Существуют различные рекомендации по выбору коэффициента запаса прочности для гибких связей океанографических систем. По данным американских стандартов, его принимают равным $n = 6$–8 для буйрепов [11]. Как отмечается в [108, с. 39], буйковые станции могут устанавливаться на глубинах более 5000 м.

Для кабель-буксиров [176] $n = 3$–5 без обтекателей и $n = 2$–5 с обтекателями, большой запас прочности для троса без обтекателей целесообразно принимать с целью обеспечения его живучести, так как вибрации троса без обтекателей, особенно на высоких частотах, значительно интенсивнее вибраций троса с обтекателями. Однако, такой расчёт не учитывает при выборе канатов их тип, конструкцию и другие факторы (более трёх десятков), влияющие на продолжительность эксплуатации каната [12, с. 4].

Практически не исследованы вопросы прочности стальных канатов БС при зацепе за подводные препятствия [384, 403]. В связи с этим предлагается рассмотреть вопрос определения максимального натяжения и оценки прочности буксирного троса ПБС при его зацепе за подводное препятствие.

Рассмотрим систему «судно-буксировщик – трос – буксируемый объект». С точки зрения механики ПБС можно представить как систему, объединяющую два разнородных объекта: привязной объект, в качестве которого может рассматриваться буксируемый объект (подводный аппарат – ПА, трос, трал и т. п.), и ГС — систему с распределенными параметрами. Типовая однозвенная подводная буксируемся система (ОПБС) содержит движущееся с постоянной скоростью судно-буксировщик (СБ) с кабельной лебедкой (КЛ), буксирующее несамоходный ПА (НПА) на неизменной глубине $h_{\text{СПА}}$, и кабель-буксир (КБ) с кабель-тросом (КТ) регулируемой длины (рис. 4.6).

В качестве судна-буксировщика на рисунке показан базовый тральщик (БТЩ) пр. 257Д. БТЩ буксирует СПА, который связан с БТЩ кабель-тросом (КТ) при помощи кабель-буксира (КБ).

Коренной конец КБ, закреплённый на БТЩ и соединённый с энергетическим и информационно-управляющим оборудованием, проходит через тральный клюз на корме тральщика и входит в воду под определённым углом, этот угол может меняться в зависимости от глубины хода СПА $h_{\text{СПА}}$ и скорости буксировки СПА $V_{\text{СПА}}$.

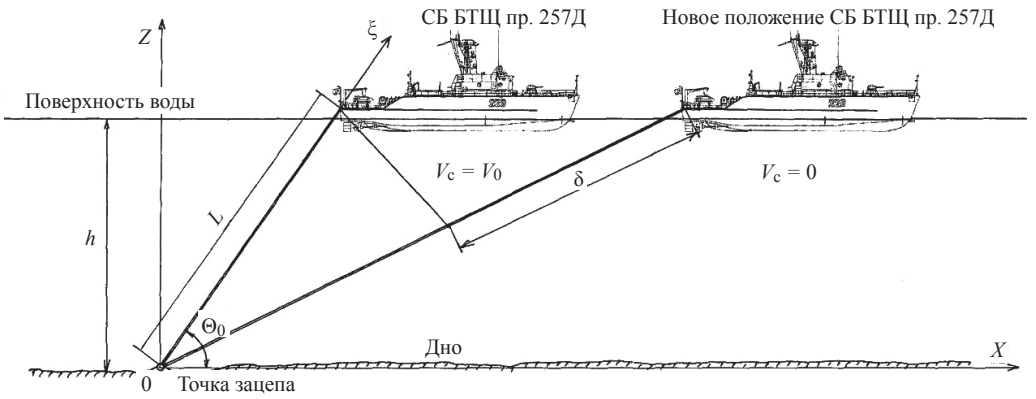


Рис. 4.6. Схема действия сил в буксируемой системе при зацепе троса за дно

Полагаем, что система движется с постоянной скоростью V_0. В некоторый момент буксируемый объект, например, трос, жёстко цепляется за дно. В течение времени $2t_0$, где $t_0 = L/c_0$ — время; L — длина троса; c_0 — скорость продольных волн в тросе; судно движется с прежней скоростью.

В момент $t = 0$ скорость судна становится равной нулю ($V_0 = 0$) и происходит рывок. В этот момент трос получает деформацию растяжения

$$\delta = 2V_0 \frac{L}{c_0} \cdot \cos\theta_0, \tag{4.43}$$

где $\cos\theta_0 = \frac{h}{L}$ — угол между тросом и линией дна;

h — глубина акватории;

$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}}$,

E — модуль упругости троса;

ρ_0 — плотность материала троса.

Масса троса длины L будет иметь значение

$$m_0 = \rho_0 LS, \tag{4.44}$$

где S — площадь поперечного сечения троса.

Математическая постановка задачи имеет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2}, \; u = u(\xi, t), \tag{4.45}$$

ξ — координата, $0 \le \xi \le L$.

Граничные условия имеют вид

$$\xi = 0, \; u = 0. \tag{4.46}$$

$$\xi = L,\ M\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -ES\frac{\partial u}{\partial \xi}. \tag{4.47}$$

$$M = M_0 + M_1, \tag{4.48}$$

где M_0 — масса судна;

M_1 — присоединённая масса жидкости ($M_1 \approx M_0$).

Начальные условия принимаем в виде

$$t = 0:\begin{cases} u = \dfrac{\partial u}{\partial t} = 0, 0 \le \xi \le L, & (4.49) \\ u = \delta \text{ при } \xi = L. & (4.50) \end{cases}$$

Согласно [182] решение начально-краевой задачи (1)–(8) имеет вид

$$u(\xi,t) = 2\delta \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\dfrac{m_0}{M\gamma_n^2} - 1\right)\cdot \cos\gamma_n}{\gamma_n\left(1 - \dfrac{\sin 2\gamma_n}{2\gamma_n}\right)} \cdot \cos\frac{\gamma_n c_0 t}{L} \cdot \sin\frac{\gamma_n \xi}{L}, \tag{4.51}$$

где γ_n — корни уравнения $\gamma_n \operatorname{tg}\gamma_n = \mu$, $\mu = \dfrac{m_0}{M}$.

Натяжение троса определяется следующим образом:

$$T(\xi,t) = ES\frac{\partial u}{\partial \xi}. \tag{4.52}$$

Подставляя (9) в (10), получаем

$$T(\xi,t) = ES \cdot \frac{2\delta}{L} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\dfrac{\mu}{\gamma_n^2} - 1\right)\cdot \cos\gamma_n}{\left(1 - \dfrac{\sin 2\gamma_n}{2\gamma_n}\right)} \cdot \cos\frac{\gamma_n c_0 t}{L} \cdot \cos\frac{\gamma_n \xi}{L}. \tag{4.53}$$

Максимальное натяжение троса

$$\max T(0,t) = 2ES \cdot \frac{\delta}{L} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\dfrac{\gamma}{\gamma_n^2} - 1\right)\cdot \cos\gamma_n}{\left(1 - \dfrac{\sin 2\gamma_n}{2\gamma_n}\right)} \cdot \cos\frac{\gamma_n c_0 t}{L}. \tag{4.54}$$

Рассмотрим случай, когда $\mu^2 << 1$, т. е. масса вытравленного троса намного меньше массы судна. Тогда имеем

$$\mu_n \operatorname{tg}\gamma_n = \mu. \tag{4.55}$$

Откуда $\operatorname{tg}\gamma_n \approx \gamma_n$ и $\gamma_n^2 = \mu$, а

$$\gamma_{n=1} = \sqrt{\mu}. \tag{4.56}$$

Следовательно, в формуле (4.54) достаточно оставить один член ряда при $n = 1$. Тогда имеем

$$\max T = 2ES \cdot \frac{\delta}{L} \cdot \frac{\left(\frac{\mu}{\gamma_1^2} - 1\right) \cdot \cos\gamma_1}{\left(1 - \frac{\sin 2\gamma_1}{2\gamma_1}\right)} \cdot \cos\frac{\gamma_1 c_0 t}{L}. \tag{4.57}$$

Далее, учитывая, что $\mu^2 << 1$ и $\gamma_1^2 << 1$, получаем

$$\left(\frac{\mu}{\gamma_1^2} - 1\right) \approx \frac{\gamma_1^2}{3};$$

$$\left(1 - \frac{\sin 2\gamma_1}{2\gamma_1}\right) \approx \frac{2}{3}\gamma_1^2;\ \cos\gamma_1 \approx 1. \tag{4.58}$$

Тогда, подставляя (14) и (16) в (15), получаем

$$\max T \approx \frac{\delta}{L} ES \cdot \cos\frac{\gamma_1 c_0 t}{L},$$

или

$$\max T \approx \frac{2V_0}{c_0} \cdot \cos\theta_0 ES \cdot \cos\left(\sqrt{\mu}\,\frac{c_0 t}{L}\right). \tag{4.59}$$

В безразмерном виде

$$\max \overline{T} = \frac{\max T}{2ES\left(\frac{V_0}{c_0}\right) \cdot \cos\theta_0} = \cos\sqrt{\mu}\tau, \text{ где } \tau = \frac{c_0 t}{L}, (\tau < 1). \tag{4.60}$$

Таким образом, для оценки прочности буксирного троса имеем формулу (4.60).

В результате проведенного исследования получена формула для максимального натяжения буксирного троса ПБС, что позволяет перейти к оценке его прочности. Такой подход является новым при оценке усилий натяжения в буксирных тросах, в том числе и при аварийных режимах работы ПБС.

Рассмотрим математическую модель рывка судна при «мертвом» зацепе траловой доски за донное препятствие. Зацеп траловой доски исключает упругое демпфирование трала, и нагрузка в этом случае возникает только в самом ваере. Полагаем, что судно-траулер вместе с донным тралом движется со скоростью V_0. Глубина траления (глубина водоема) составляет h, длина вытравленной части ваера L. В результате зацепа траловой доски за донное препятствие нижний конец ваера в момент $t = 0$ оказывается закрепленным. Судно, имея в этот момент скорость V_0, продолжает двигаться по инерции и под действием упора винта P_0, которое ещё некоторое время не меняется. Определим возникшее напряженное состояния ваера.

Дополнительно полагаем, что ваер имеет плоскую конфигурацию, и, кроме того, конфигурация (кривая) ваера близка к прямолинейному отрезку длиной L. Во-первых, ваер нагружен большим буксировочным сопротивлением самого трала. Во-вторых, силы, действующие на элемент ваера малой длины (силы тяжести ваера

и сопротивления воды) имеют различные направления, что также приводит к выпрямлению ваера. Пусть ваер представляет собой прямолинейный отрезок длины L, который составляет с плоскостью дна (и поверхностью воды) угол θ_0, так что

$$\operatorname{tg}\theta_0 = h/l = h/\sqrt{h^2 + L^2};$$

$$\cos\theta_0 = l/L = \sqrt{h^2 + L^2}/L = \sqrt{1 + (h/l)^2}\,.$$

В результате зацепа нижнего конца ваера к верхнему концу прикладывается импульсная нагрузка движущимся судном-траулером. При глубоководном тралении (h = 2000–4000 м) импульсная нагрузка распространяется по ваеру как по волноводу со скоростью C_0 и достигает точки закрепления, где происходит отражение импульса (волны) нагружения. Покажем, что этот момент является наиболее опасным с точки зрения достижения max величины динамического натяжения ваера $T(t)$.

Для решения задачи выберем две системы координат. Система oxz, где ось ox направлена по поверхности воды в сторону движения судна, а ось oz направлена в сторону дна и пересекает плоскость дна в точке O_1. Ось $O_1\xi$ направим в сторону судна. При этом ось $O_1\xi$ совпадает с линией ваера (рис. 4.4).

Напряженно-деформируемое состояние ваера описывается волновым уравнением

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} - \frac{1}{{c_0}^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \tag{4.61}$$

где u — продольная деформация растяжения ваера;

t — время ($t \geq 0$);

ξ — координата ($0 \leq \xi \leq L$);

c_0 – скорость распространения волн нагружения по тросу, как по волноводу.

Решение уравнения (4.21) в виде $u = u(\xi, t)$ должно удовлетворять граничным и начальным условиям. Граничное условие в точке закрепления ($\xi = 0$) заключается в том, что деформация в этой точке равна нулю, т.е.

$$\xi = 0\colon u(0,t) = 0. \tag{4.62}$$

В точке крепления ваера на судне величина деформации связана с величиной перемещения судна с момента $t = 0$

$$\xi = L\colon m\frac{d^2x}{dt^2} + F(x,t) = P_0(t), \tag{4.63}$$

где dx — смещение судна ($dx = d\xi\cos\theta_0$);

$P_0(t)$ — упор винта;

$F(x,t)$ — действие трала на судно;

m — суммарная масса, определяемая в свою очередь как

$$m = m_0 + m_1, \tag{4.64}$$

где m_0 — масса судна;

m_1 — присоединённая масса воды при продольном движении судна.

Заметим, что

$$F(x,t)=\left.\frac{T(\xi,t)}{\cos\theta_0}\right|_{\xi=L},\quad \frac{dx}{dt}=\left.\frac{dx}{d\xi}\right|_{\xi=L}\frac{du}{dt}=\dot{u}\cos\theta_0. \tag{4.65}$$

где $T(L,t)$ — натяжение троса в точке крепления ваера к судну.

Начальные условия имеют вид

$$t=0:\begin{cases} u=\dfrac{\partial u}{\partial t}=0, & \text{при } 0\le\xi<\mathrm{L};\\ \dfrac{\partial u}{\partial t}=V_0\delta(\xi-L), & \text{при } \xi=\mathrm{L}, \end{cases} \tag{4.66}$$

где $\delta(\xi-L)$ — дельта-функция Дирака;

V_0 — скорость движения судна при $t=0$.

В свою очередь, величина натяжения троса и скорость волн определяется как

$$T(\xi,t)=(ES)_{mp.}\frac{\partial u}{\partial\xi},\ C_0=\sqrt{E/\rho}, \tag{4.67}$$

где E — модуль упругости материала троса (модуль Юнга);

S — площадь поперечного сечения троса $S=\dfrac{\pi d^2}{4}$, (4.68)

где d — диаметр троса.

Далее полагаем, что $P_0(t)=P_0=\text{const}$. В случае неоднородного по сечению троса (например, из металлических свивок и растительного волокна) определение $(ES)_{\text{тр}}$ является самостоятельной задачей.

Учитывая соотношения (4.63), (4.65), (4.67), граничное условие (4.63) представим в виде:

$$\xi=L:\ \frac{\partial u}{\partial\xi}=\frac{1}{ES}\left[\frac{P_0}{\cos\theta_0}-m\frac{\partial^2u}{\partial t^2}\right]. \tag{4.69}$$

Таким образом, начально-краевая волновая задача нагружения ваера принимает вид:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial^2u}{\partial\xi^2}-\frac{1}{C_0}\frac{\partial^2u}{\partial t^2}=0; && 0\le\xi\le L\\ &\xi=0:u=0;\\ &\xi=L:\frac{\partial u}{\partial\xi}=\frac{1}{ES}\left[\frac{P_0}{\cos\theta_0}-m\frac{\partial^2u}{\partial t^2}\right];\\ &t=0:\begin{cases} u(\xi,0)=\dfrac{\partial u(\xi,0)}{\partial t} & \text{при } 0\le\xi\le L\\ \dfrac{\partial u}{\partial t}(\xi,0)=V_0\delta(\xi-L) & \text{при } \xi=L \end{cases}\\ &T(\xi,t)=ES\frac{\partial u}{\partial\xi}. \end{aligned}\right\}. \tag{4.70}$$

Для решения краевой задачи (10) воспользуемся преобразованием Лапласа по времени t [182]

$$u^L(\xi, p) = \int_0^\infty e^{-pt} u(\xi, t) dt, \tag{4.71}$$

где ρ — параметр преобразования;

u^L — трансформанта преобразования;

u — оригинал.

В области изображений (в трансформантах) краевая задача (4.70) примет вид:

$$\frac{\partial^2 u^2}{\partial \xi^2} - \left(\frac{p}{c_0}\right)^2 u^2 = 0; \tag{4.72}$$

$$u^L(0,p) = 0 \text{ при } \xi = 0; \tag{4.73}$$

$$\frac{du^L(p,\xi)}{d\xi} = \frac{1}{(ES)}\left[\frac{1}{p}\left(\frac{P_0}{\cos\theta_0}\right) - mu^L(p,\xi)p^2 + mV_0\right] \text{ при } \xi = L. \tag{4.74}$$

Уравнение (4.74) перепишем в виде

$$\frac{du^L}{d\xi} + \frac{mp^2}{(ES)}u^L = \frac{1}{p}\left(\frac{P_0}{\cos\theta_0}\right)\frac{1}{ES} + \frac{mV_0}{ES}p, \text{ где } \xi = L. \tag{4.75}$$

Решение волнового уравнения (4.72) имеет вид

$$u^L(\xi, p) = Ae^{\frac{p}{c_0}\xi} + Be^{-\frac{p}{C_0}\xi}, \tag{4.76}$$

где A и B — постоянные интегрирования

Удовлетворяя решение (4.76) граничному условию (4.73), получаем

$$A + B = 0 \text{ или } B = -A. \tag{4.77}$$

Подставим решение (4.76) в граничное условие (4.75), для чего найдем первоначально производную

$$\frac{du^L}{d\xi} = \frac{p}{C_0}\left[Ae^{-\frac{p}{c_0}\xi} - Be^{-\frac{p}{C_0}\xi}\right]. \tag{4.78}$$

С учетом (4.77) соотношения (4.76) и (4.78) при $\xi = L$ принимают вид

$$\left.\begin{aligned} u^L(L,p) &= A\left(e^{\frac{p}{c_0}L} - e^{-\frac{p}{c_0}L}\right) \\ \frac{\partial u^L}{\partial \xi}(L,p) &= +A\frac{p}{C_0}\left(e^{\frac{p}{c_0}L} + e^{-\frac{p}{c_0}L}\right) \end{aligned}\right\}. \tag{4.79}$$

Подставляя (4.79) в (4.75), получаем

$$A\frac{p}{C_0}\left(e^{\frac{p}{c_0}L}+e^{-\frac{p}{c_0}L}\right)+\frac{mp^2}{ES}A\left(e^{\frac{p}{c_0}L}-e^{-\frac{p}{c_0}L}\right)=\frac{1}{p}\left(\frac{P_0}{\cos\theta_0}\right)\frac{1}{ES}+\frac{mV_0}{ES},$$

откуда найдем

$$B=-A=\frac{\frac{1}{p}\left(\frac{P_0}{\cos\theta_0}\right)\frac{1}{ES}+\frac{mV_0}{ES}}{e^{\frac{p}{c_0}L}\left(\frac{p}{C_0}+\frac{m}{ES}p^2\right)+e^{-\frac{p}{C_0}L}\left(\frac{p}{C_0}-\frac{m}{ES}p^2\right)}. \tag{4.80}$$

Введем следующие обозначения: $a=\dfrac{ES}{mC_0}$; $b=\dfrac{p-a}{p+a}$.

Тогда из (4.80) получим

$$B=-A=\frac{\left(pV_0+\frac{1}{p}\frac{P_0}{m\cos\theta_0}\right)e^{-\frac{pL}{C_0}}}{p+(p+a)\left[1-be^{-\frac{2pL}{C_0}}\right]}. \tag{4.81}$$

Используя представление (4.81), найдем трансформанту усилия в ваере:

$$T^L(\xi,p)=\frac{ES}{C_0}\cdot\frac{\left(V_0+\frac{1}{p}\frac{P_0}{m\cos\theta_0}\right)}{(p+a)\left[1-be^{-2p\frac{L}{C_0}}\right]}\left(e^{\frac{p(\xi-L)}{C_0}}+e^{\frac{-p(\xi-L)}{C_0}}\right). \tag{4.82}$$

Максимального значения $T^L(\xi,p)$ по (4.82) достигает при $\xi = 0$:

$$\max T^L(\xi,p)=T^L(0,p)=\frac{2ES}{C_0}\cdot\frac{\left(V_0+\frac{1}{p}\frac{P_0}{m\cos\theta_0}\right)}{(p+a)\left[1-be^{-2p\frac{L}{C_0}}\right]}. \tag{4.83}$$

В общем случае обратное преобразование Лапласа выражений (4.82) или (4.83) можно выполнить, следуя рекомендациям [352]. Однако здесь ограничимся нахождением оригинала трансформанты (4.83) для малых значений времени *t*. Для определения нагрузки первого импульса из (4.83) получим:

$$\overline{T}^L(0,p)=\frac{T^L(0,p)}{ES}=2\left[\frac{V_0}{C_0}\frac{1}{p+a}+\frac{P_0}{mC_0\cos\theta_0}\frac{1}{p(p+a)}\right]e^{-\frac{pL}{C_0}}. \tag{4.84}$$

Переходя в (4.84) к оригиналам, получим выражение для первого импульса натяжения в тросе:

$$\overline{T}(0,t)=2\left[\frac{V_0}{C_0}e^{-a\left(t-L/C_0\right)}+\frac{P_0}{mC_0\cos\theta_0}\frac{1}{a}\left(1-e^{-a\left(t-L/C_0\right)}\right)\right]. \qquad (4.85)$$

Принимая в (4.85) $t=\dfrac{L}{C_0}$, получим амплитудное значение для натяжения троса в точке зацепа:

$$\overline{T}(0,t)=2\left[\frac{V_0}{C_0}+\frac{P_0 mC_0}{mC_0\cos\theta_0 ES}\right]=2\left(\frac{V_0}{C_0}+\frac{P_0}{ES\cos\theta_0}\right). \qquad (4.86)$$

Определим максимальное напряжение в тросе, учитывая, что $\sigma=\dfrac{T}{S}$:

$$\max\sigma=2E\left(\frac{V_0}{C_0}+\frac{P_0}{ES\cos\theta_0}\right). \qquad (4.87)$$

Выражениями (4.85) и (4.87) определены максимальные нагрузки в тросе. Выполнение численных расчетов для конкретных случаев не представляет труда.

Впервые рассмотрена и поставлена задача моделирования зацепа трала (траловой доски) за донное препятствие при глубоководном рыболовном промысле. Поставленная задача имеет важное значение как с точки зрения безопасности мореплавания комплекса «судно – глубоководный траловый комплекс», так и обеспечения сохранности трала при аварийных ситуациях. Математическая модель позволяет определить напряженно-деформируемое состояние трала (ваера) при зацепе трала на полном ходу. Получено аналитическое решение задачи по определению максимального усилия напряжения для ваера в точке зацепа. Следует отметить простой вид научных представлений.

4.3.2. Столкновение ГС ПБС с подводным объектом посередине гибкой связи

В определённые времена года в некоторых районах Мирового океана, морях и проливах, отдельных внутренних водоёмах довольно частыми являются столкновения судов и ПЛ, МПС и ПБС с крупными морскими обитателями: морскими черепахами, рыбами и млекопитающими в период сезонных миграций с мест зимовки в тропических водах к местам нагула в холодные воды Южного и Северного полушарий [420]. Характеристика наиболее крупных рыб и морских млекопитающих приведена в таблице 4.6 [11, 48, 95, 104, 169, 206, 193–194, 261]. Приведём некоторые примеры столкновений морских обитателей с подводными аппаратами, буксирными тросами и т.п. 6 июля 1967 г. исследовательский подводный аппарат Океанографического института в Вудс-Холле (США) «Элвин» (длина 6,6 м) погрузился в Атлантическом океане на глубину 619 м для выполнения геологических работ и разведки дна, богатого конкрециями [104, с. 214].

Едва «Элвин» начал медленно продвигаться у дна, снаружи раздался легкий удар о корпус — на аппарат напала меч-рыба. Удар пришелся точно под иллюминатор правого борта (рис. 4.7). Рыба была длиной 2,45 м и весила 89 кг [169, с. 15].

В 1969 г. подобной атаке подвергся подводный аппарат «Бен Франклин» на глубине 282 м при плавании его в течении Гольфстрим [104, с. 214]. Меч-рыба (вес до 100 кг, а скорость движения при атаке — 10 м/с) пошла на таран и врезалась в обшивку. Легкий корпус аппарата оказался поврежденным, и работу пришлось прекратить.

Потенциальную опасность для аппаратов и подводных лодок представляет возможное столкновение и с другими крупными обитателями океана. Так, 5 октября 1959 г. атомная подводная лодка США «Си Дрэгон» столкнулась в подводном положении с китом, повредив при этом винт и гребной вал [169, с. 15].

Таблица 4.6. Характеристика наиболее крупных рыб и морских млекопитающих

№ п/п	Наименование	Вид	Глубина обитания, м	Максимальная		
				длина тела, м	масса, т	скорость, км/ч
1	2	3	4	5	6	7
1.	Акула китовая	м. р.	~ 50	15,0–18.0	~ 20,0	~ 10,0
2.	Акула белая	м. р.	~ 100	10,0–12,0	3,0–5,0	~ 40,0
3.	Скат (манта)	м. р.	~ 200	~ 7,0	~ 2,5	~ 50,0
4.	Меч-рыба	м. р.	~ 610	~ 2,5	~ 0,9	~ 90,0
5.	Парусники	м. р.	~ 200	~ 3,0	> 0,5	90,0
6.	Синий марлин	м. р.	~ 200	> 5,0	~ 1,0	> 90,0
7.	Тунец (синий)	м. р.	~ 200	> 3,0	~ 0,4	~ 57,6
8.	Зубатка	м. р.	~ 950	~ 3,0	~ 0,05	~ 10,0
9.	Рыба-пила	м. р.	~ 100	~ 6,6	~ 0,1	~ 60,0
10.	Белый осетр	м. р.	~ 20	~ 6,0	> 0,45	~ 10,0
11.	Морской окунь	м. р.	~ 100	~ 4,0	~ 0,54	~ 10,0
12.	Горбатый кит	м. м.	~ 90	~ 16,0	~ 40,0	~ 64,4
13.	Голубой кит	м. м.	> 200	~ 33,0	~ 150,0	> 55,2
14.	Кашалот	м. м.	> 1000	~ 20,0	70,0–100,0	~ 36,8
15.	Косатка	м. м.	100	~ 10,0	8,0–15,0	~ 42,3
16.	Дельфин	м. м.	~ 120	1,2–10,0	~ 1,0	~ 40,0
17.	Гринда	м. м.	~100	~ 6,50	~ 2,00	~ 40,0
18.	Белуга	м. м.	~ 20	6,0	~ 1,35	~ 8,0
19.	Морская корова	м. м.	~ 20	2,4	1,00	~ 5,0
20.	Морской котик	м. м.	~ 20	~ 2,25	~ 0,5	~ 40,0
21.	Морской лев	м. м.	~ 20	~ 3,6	1,25	~ 8,0
22.	Морж	м. м.	50–70	~ 4,0	~ 1,5	~ 10,0
23.	Кальмар	гл. м.	~ 8000	~ 17,0	~ 1,5	~ 35,0

Примечания к таблице: морские рыбы — м. р.; морское млекопитающее — м. м; головоногий моллюск — гл. м.

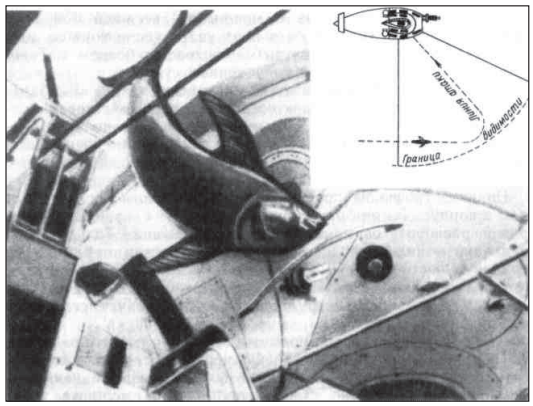


Рис. 4.7. Меч-рыба атакует подводный аппарат «Элвин» [104]

Рассмотрим случай, когда при буксировке ПБО происходит столкновение морского млекопитающего, например, кита (малого полосатика — Balaenoptera acutirostrata) [212, с. 330] с буксирным тросом. Полагаем, что система «надводное судно-буксировщик – буксирный трос – буксируемый подводный объект» движется с постоянной скоростью V_{01}. Буксирный трос растянут силой натяжения T_0 так, что его можно рассматривать как струну длиной $2l_0$ с закреплёнными концами. В некоторый момент времени, который принимаем за начало отсчёта ($t = 0$), по тросу ударяет тело массой m_2, движущееся со скоростью V_{02} (рис. 4.8).

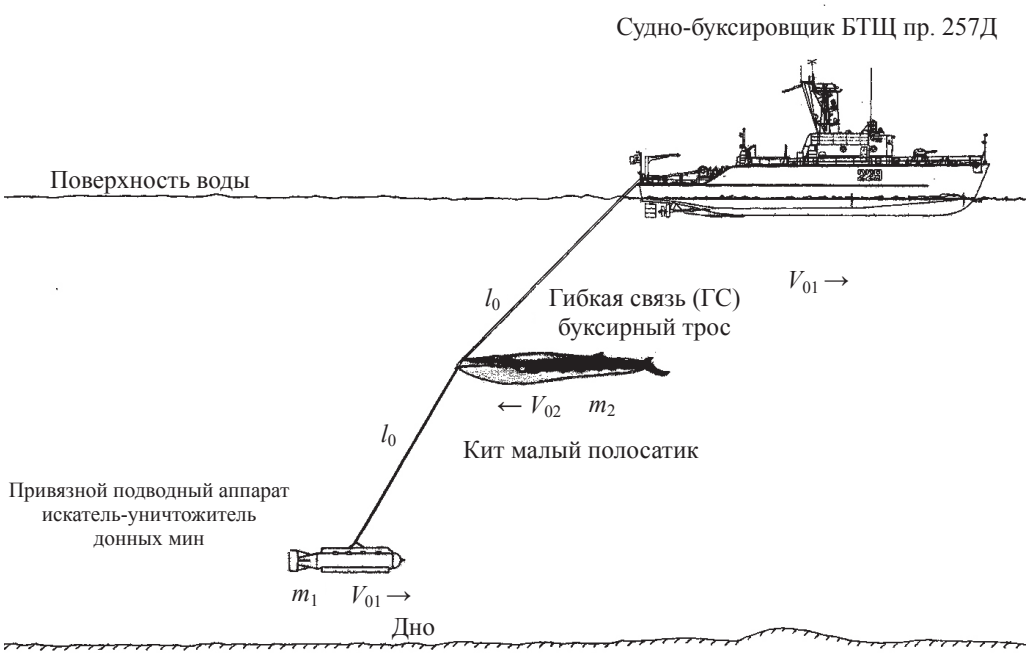


Рис. 4.8. Схема системы «надводное судно – буксировщик – буксирный трос – подводный буксируемый объект» в момент удара встречного ПО по буксирному тросу

Удар происходит посередине буксирного троса. Найдём максимальные дополнительное натяжение ΔT в результате удара неизвестного подводного объекта (ПО) по буксирному тросу. В первом приближении буксирный трос будем рассматривать как растяжимую невесомую нить. По методу Релея для консервативной системы следует равенство наибольшей кинетической энергии K и потенциальной энергии $П$ системы, т.е.

$$K = П. \tag{4.88}$$

Кинетическая энергия объекта в системе координат, жёстко связанной с судном, равна

$$K = \frac{m_2 V_0^2}{2}, \tag{4.89}$$

$$V = V_{01} + V_{02}, \tag{4.90}$$

где V_{01} — скорость движения судна-буксировщика;

V_{02} — скорость движения встречного подводного объекта.

Потенциальная энергия двух половинок троса

$$П = 2\int_0^{\Delta l_{\max}} \Delta T d(\Delta l), \tag{4.91}$$

где ΔT — динамическое натяжение троса при ударе встречного ПО по тросу;

Δl — удлинение каждой половины троса в результате удара.

В свою очередь, имеем:

$$\Delta T = c \cdot \left(\frac{\Delta l}{l_0}\right), \tag{4.92}$$

$$c = EF, \tag{4.93}$$

где E — модуль упругости Юнга материала троса;

F — площадь поперечного сечения троса;

l_0 — половина длины троса.

Приравнивая в соответствии с (4.88) выражение для энергий (4.89) и (4.91), находим относительное удлинение троса:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \left(\frac{1}{2} m_2 c l_0 V_0^2\right)^{\frac{1}{2}}. \tag{4.94}$$

Теперь, используя соотношения (4.93) и (4.94), по (4.92) найдём величину динамической добавки натяжения троса:

$$\Delta T = V_0 \sqrt{\frac{m_2 EF}{2l_0}}. \tag{4.95}$$

После ряда преобразований (4.95) можно получить несколько иное представление для ΔT:

$$\Delta T = \rho_0 V_0 a_0 \sqrt{\frac{m_2}{m_{\text{тр}}}}, \tag{4.96}$$

где ρ — плотность материала троса;

$m_{\text{тр}}$ — масса всего троса.

Напомним, что

$$a_0 = \frac{E}{\rho_0}, \tag{4.97}$$

$$m_{\text{тр}} = 2(\rho_0 l_0 F). \tag{4.98}$$

Величину суммарного натяжения троса определяем как сумму статической и динамической составляющих:

$$T = T_0 + \Delta T. \tag{4.99}$$

Во втором приближении будем рассматривать буксирный трос как растяжимую нить с точечным эквивалентным грузом m_1, размещённым в точке удара [329], учитывая инерционные свойства самого троса.

Для определения эквивалентной массы троса в виде сосредоточенного груза используем уравнение движения струны и уравнение движения груза:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + w_0^2 y = 0, \tag{4.100}$$

$$w_0 = \frac{\pi}{2l_0}\sqrt{\frac{T_0}{q}}, \tag{4.101}$$

где q — масса троса единичной длины.

$$m_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2T_0}{l_0} y = 0 \text{ или } \frac{d^2 y}{dt^2} + k^2 y = 0, \tag{4.102}$$

где

$$k^2 = \frac{2T_0}{l_0 m_1}. \tag{4.103}$$

Приравнивая коэффициенты (4.101) и (4.103) в уравнениях движения (4.100) и (4.102), найдём выражения для эквивалентной массы груза:

$$m_1 = \frac{4l_0}{\pi^2} y \approx 0{,}8(\rho_0 l_0 F). \tag{4.104}$$

При ударе объекта массой m_2, движущегося со скоростью V_{02}, и массы эквивалентного груза m_1, движущегося со скоростью V_{01}, система получит скорость

$$V_0 = (V_{01} + V_{02})\frac{m_2}{m_1 + m_2}. \tag{4.105}$$

Таким образом, кинетическая энергия системы запишется в виде

$$K = (m_1 + m_2)\frac{V_0^2}{2}, \tag{4.106}$$

где V_0 определяется выражением (4.105).

Потенциальная энергия растяжения троса определяется выражением (4.91) или выражением

$$П = cl_0\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)^2. \tag{4.107}$$

Приравнивая значения кинетической и потенциальной энергий по (4.106) и (4.107), получим:

$$\frac{(m_1 + m_2)V_0^2}{2} = cl_0\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)^2. \tag{4.108}$$

Из (4.108) с учётом (4.105) и (4.93) найдём

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{(V_{01} + V_{02})}{\sqrt{2EFl_0}}\sqrt{\frac{m_2}{1 + \frac{m_1}{m_2}}}. \tag{4.109}$$

Далее по (4.92) с учётом (4.109) динамическое натяжение в тросе

$$\Delta T = (V_{01} + V_{02})\sqrt{\frac{EFm_2}{2l_0\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right)}}. \tag{4.110}$$

Выражения для динамического натяжения троса от удара без учёта массы троса:

$$\Delta T = (V_{01} + V_{02})\sqrt{\frac{m_2 EF}{2l_0}} \tag{4.111}$$

и с учётом массы троса:

$$\Delta T = (V_{01} + V_{02})\sqrt{\frac{m_2 EF}{2l_0\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right)}}. \tag{4.112}$$

Система формул (4.111) и (4.112) показывает влияние учёта эквивалентной массы троса. Учёт массы троса приводит к уменьшению величины динамического натяжения троса. Полученные оценки динамического натяжения (4.111) и (4.112) являются приближёнными, так как не учитывают волновые процессы в самом тросе и сопротивление воды при движении троса в воде [424]. Научная новизна данного исследования заключается в совершенствоваии методики расчёта элементов МПС, например, буксирного троса ПБС, при их проектировании, учитывая ударные нагрузки.

Применим для решения данной задачи разработанную компьютерную программу описания динамики ГС МПС [393], полученную на основе математической модели динамики ГС МПС [392].

Длина ГС ($2l_0$) 100 м, её диаметр 14 мм, модуль Юнга (E) $9{,}55 \cdot 10^8$ Па, погонная масса 0,15386 кг/м обеспечивает нулевую плавучесть ГС. Нормальный коэффициент гидродинамического сопротивления ГС равен 1,8, а тангенциальный — 0,025. СН и ПА неподвижны. В начальный момент времени ГС находится в состоянии покоя, расположена вертикально и имеет форму прямой линии. Её натяжение (T) равно нулю. Затем в средней точке её длины происходит столкновение с морским объектом массой m_2 (подводным аппаратом, морским животным, рыбой или моллюском), который движется с начальной скоростью V_0 перпендикулярно к ГС.

Необходимо определить возможность использования формулы

$$\Delta T = V_0 \sqrt{\frac{m_2 EF}{2l_0}} \tag{4.113}$$

для определения максимальной силы натяжения ГС, возникающей в результате её столкновения с морским объектом (l_0 — половина длины ГС, F — площадь поперечного сечения ГС).

Формула (4.113) получена в предположении о прямолинейности участков ГС между морским объектом, ПА и СН, отсутствия волн изгиба и растяжения ГС, а также отсутствия потерь на гидродинамическое сопротивление ГС и морского объекта. Параметры моделирования приведены на рис. 4.9 (67 параметров).

Результаты математического моделирования показывают, что форма ГС в процессе взаимодействия с морским объектом может существенно отличаться от линейной формы (табл. 4.7). В процессе моделирования предполагали, что морской объект остаётся связанным с ГС (не освобождается от неё) в течение всего времени её движения как в положительном, так и в отрицательном направлении.

Сила натяжения ГС за это время существенно изменялась (рис. 4.10). При максимальной силе натяжения ГС 4,9 кН (в момент времени 8,7 с на табл. 4.7) форма её участков близка к прямолинейной, что соответствует только одному из допущений, которое использовали в процессе вывода формулы (4.111), но остальные не выполняются.

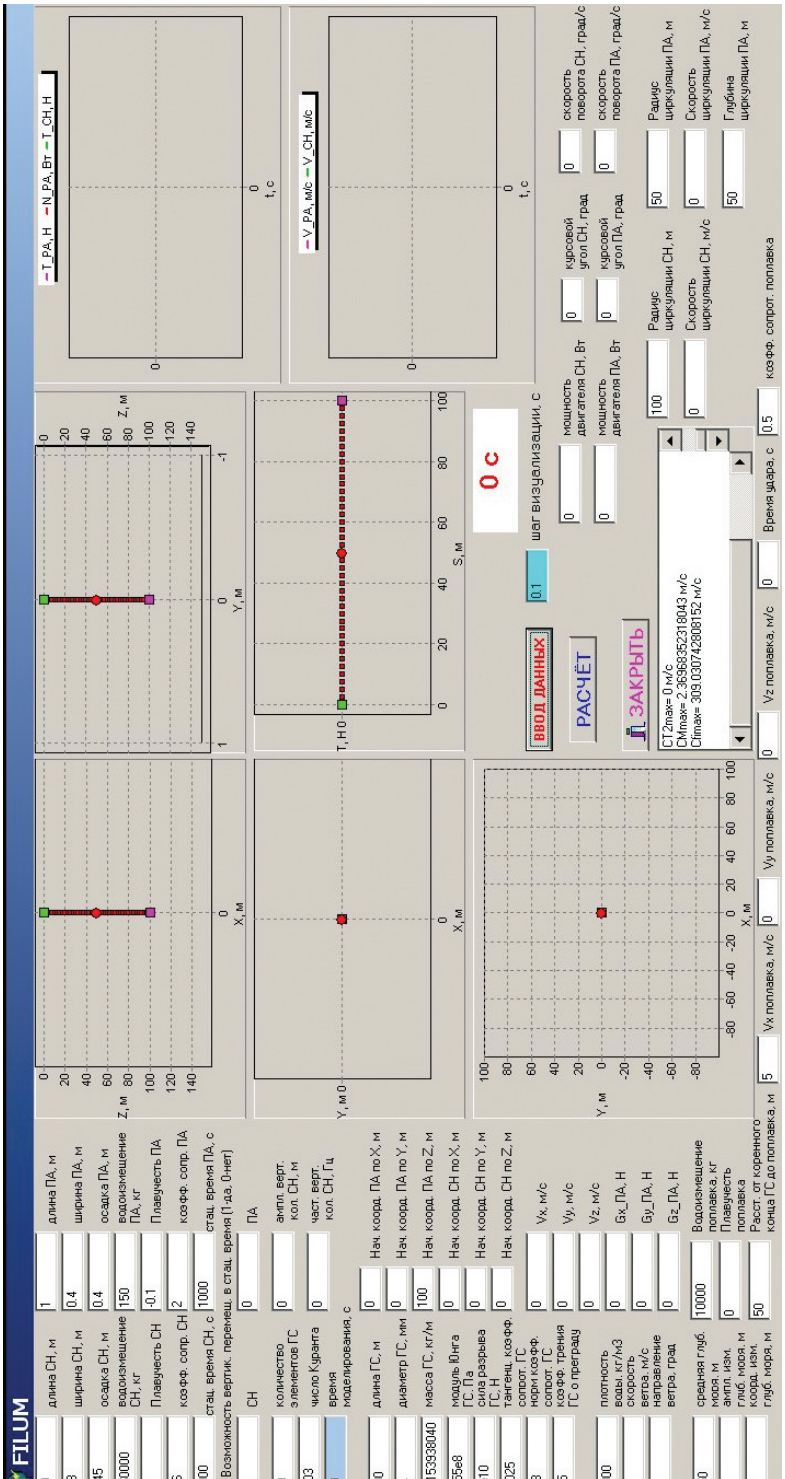
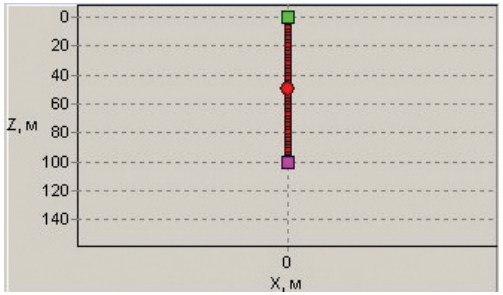
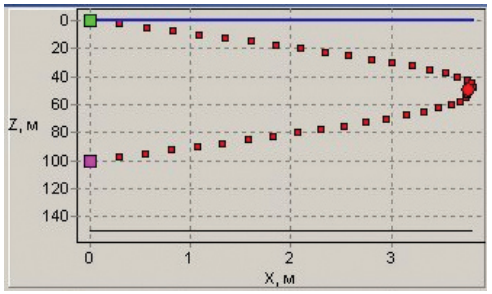
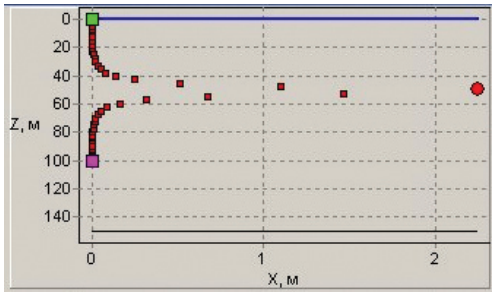
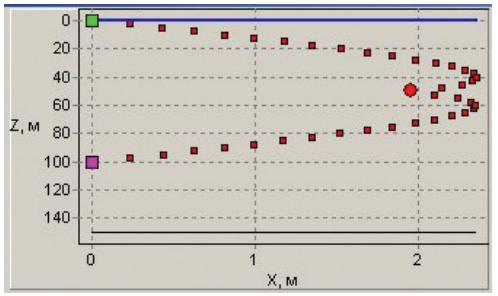
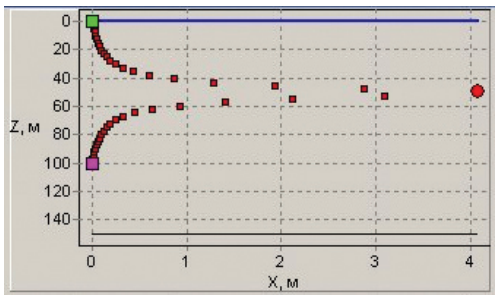
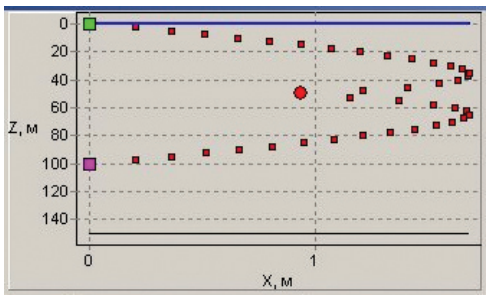
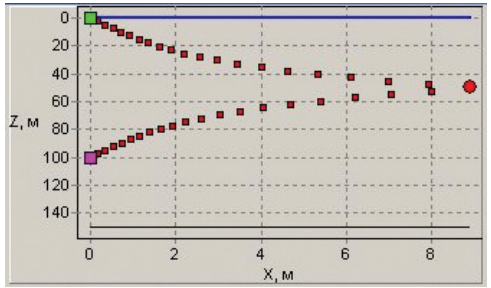
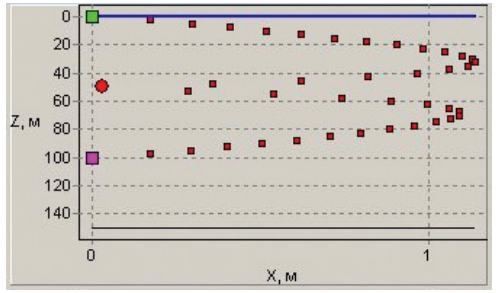
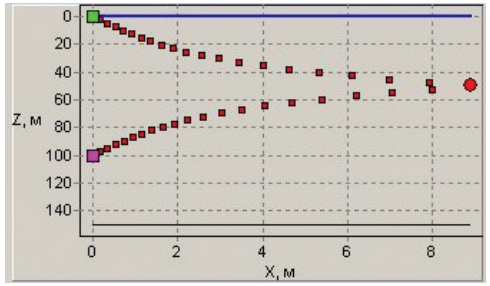
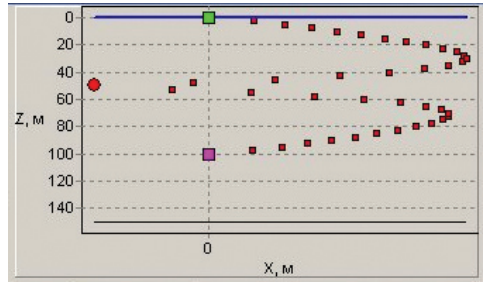
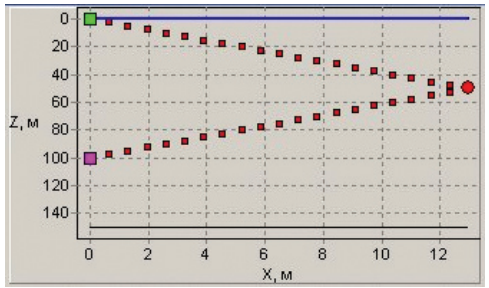


Рис. 4.9. Начальный вид окна программы

Таблица 4.7. Изменение формы ГС

Момент времени, с	Форма ГС	Момент времени, с	Форма ГС
1	*2*	*3*	*4*
0		21,9	
0,5		25	
1		27	

Окончание таблицы 4.7

1	*2*	*3*	*4*
3		29	
5		30	
8,7		–	–

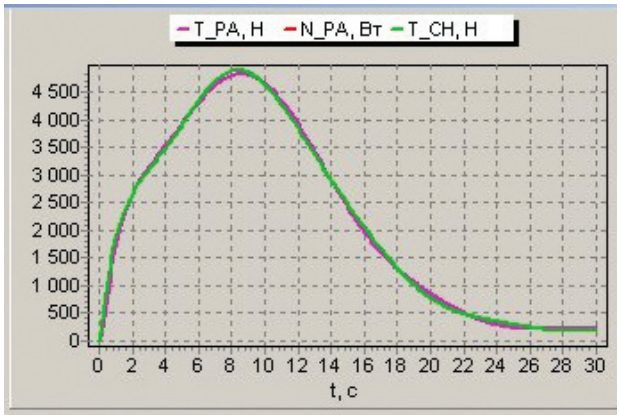


Рис. 4.10. Изменение силы натяжения ГС

На рис. 4.11–4.13 приведены результаты сравнения зависимости силы максимального натяжения ГС от скорости V_0, полученные в результате вычисления по формуле (4.111) и математического моделирования. Сравнение линий 1 и 2 показывает, что даже при отсутствии гидродинамического сопротивления ГС и мор-

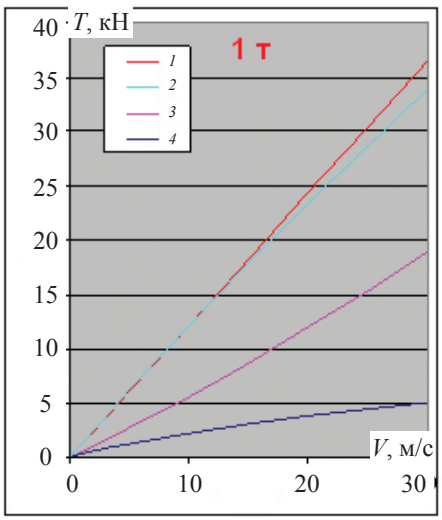


Рис. 4.11. Зависимости силы максимального натяжения ГС от скорости V_0 морского объекта массой 1 т:

1 — расчёт по формуле (4.111); *2* — математическое моделирование без учёта гидродинамического сопротивления ГС и морского объекта; *3* — математическое моделирование с учётом только гидродинамического сопротивления ГС; *4* — математическое моделирование с учётом гидродинамического сопротивления ГС и морского объекта

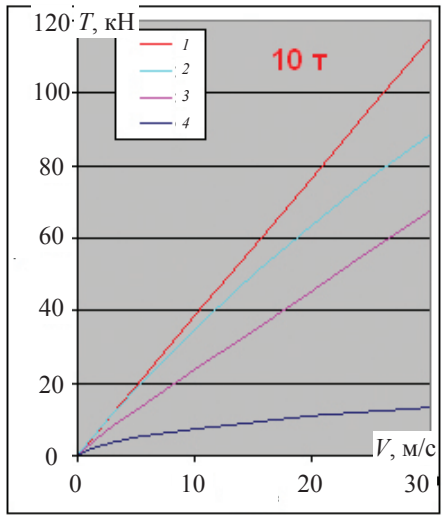


Рис. 4.12. Зависимости силы максимального натяжения ГС от скорости V_0 морского объекта массой 10 т:

1 — расчёт по формуле (4.111); *2* — математическое моделирование без учёта гидродинамического сопротивления ГС и морского объекта; *3* — математическое моделирование с учётом только гидродинамического сопротивления ГС; *4* — математическое моделирование с учётом гидродинамического сопротивления ГС и морского объекта

ского объекта нет полного согласования результатов моделирования с формулой (4.111). Отличие линий 1 и 2 возрастает с увеличением начальной скорости и массы морского объекта.

Учёт только гидродинамического сопротивления ГС (линия 3) приводит к полному несогласованию формулы (4.113) с математическим моделированием, а учёт ещё и гидродинамического сопротивления морского объекта (линия 4) в ещё большей степени увеличивает это отличие.

Увеличение массы морского объекта от 1 до 10 т, когда его начальная скорость не превышает 30 м/с, приводит к увеличению максимальной силы натяжения ГС приблизительно в 3 раза, а увеличение массы от 10 до 100 т увеличивает максимальную силу натяжения ГС приблизительно в 4 раза (рис. 4.14).

Увеличение массы в 10 раз (в интервале от 1 до 100 т) увеличивает максимальную силу натяжения ГС приблизительно в 3–4 раза.

Научная новизна данного исследования заключается в совершенствовании методики расчёта ГС МПС при их проектировании на примере ПБС (буксирного троса) на примере аварийного режима с учётом ударных нагрузок. Применение разработанной компьютерной модели динамики МПС с ГС для проверки расчётов дополнительного натяжения буксирного троса при ударе по нему в центре ППО

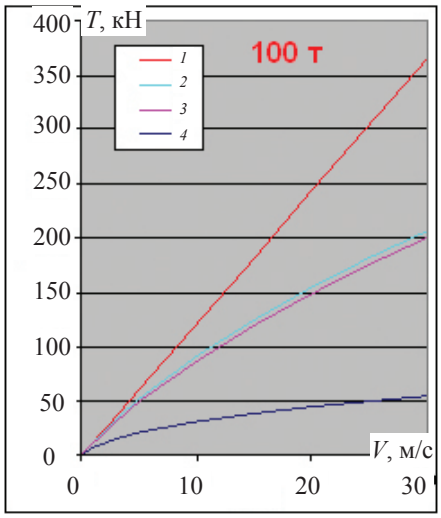


Рис. 4.13. Зависимости силы максимального натяжения ГС от скорости V_0 морского объекта массой 100 т:

1 — расчёт по формуле (4.111); *2* — математическое моделирование без учёта гидродинамического сопротивления ГС и морского объекта; *3* — математическое моделирование с учётом только гидродинамического сопротивления ГС; *4* — математическое моделирование с учётом гидродинамического сопротивления ГС и морского объекта

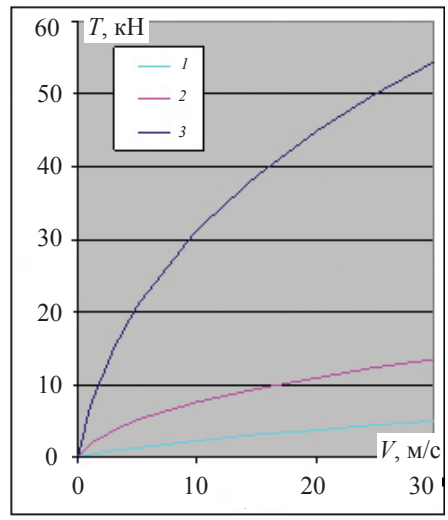


Рис. 4.14. Зависимости силы максимального натяжения ГС от скорости V_0 морского объекта:

1 — масса 1 тонна; *2* — масса 10 тонн; *3* — масса 100 тонн (математическое моделирование с учётом гидродинамического сопротивления ГС и морского объекта)

позволяет исследовать данные процессы в реальном масштабе времени, многократно моделировать данные процессы, более точно осуществлять данные расчёты и показывает универсальность разработанной компьютерной модели для расчётов параметров различных классов МПС с ГС.

4.3.3. Столкновение гибкой связи подводной буксируемой системы с подводным объектом в произвольном месте гибкой связи

Помимо столкновений буксируемых объектов с морскими животными и млекопитающими довольно часто происходят случаи столкновения элементов МПС, подводных буксируемых объектов (ПБО) и ГС данных систем с другими посторонними подводными объектами (ППО), в качестве которых могут выступать подводные лодки, привязные и автономные подводные аппараты (ПА), другие ПБО, различные подводные препятствия и объекты на дне (выступающие скалы, расщелины, кораллы, затонувшие корабли, утерянные рыбацкие сети и т.п.), элементы других МПС в процессе выполнения ими своего назначения. При этом последствия могут быть весьма тяжёлыми для сталкивающихся объектов. Рассмотрим подобный случай [426, 429].

Приведём некоторые примеры. В 1969 г. аппарат «Шелф Дайвер» (водоизмещение 7,7 т, глубина погружения 240 м, скорость подводная 3,0 уз) выполнял исследования в Мексиканском заливе [169, с. 22]. Для обозначения своего места при работе и в процессе движения аппарат буксировал на буйрепе надводный буй. Случилось так, что проходившее в районе работ надводное судно случайно зацепило буйреп и потащило аппарат за собой. Возникла аварийная ситуация. Судно срочно остановили, и водолазы перерезали буйреп. У аппарата был поврежден легкий корпус. В дальнейшем аппараты фирмы «Перри» стали оснащаться устройствами для быстрой отдачи буйрепов в аварийной обстановке.

В октябре 1970 г. необитаемый, управляемый по кабелю аппарат КУРВ-3 (масса в воздухе 2,2 т, глубина погружения 2100 м, скорость подводная 3,0 уз) был использован для поиска и последующего подъема комплекта океанографических приборов, установленного на глубине 1850 м у о. Ванкувер (Тихоокеанское побережье США) [169, с. 24–25]. Конструкция комплекта предусматривала его самостоятельное всплытие по команде, передаваемой по гидроакустическому каналу с поверхности. Но по какой-то причине система всплытия не сработала и комплект оказался утерянным. Поиск комплекта приборов аппаратом КУРВ-3 обеспечивался судном «Файр Веза». Через 4 ч безрезультатного поиска погода резко ухудшилась (скорость ветра достигла 15 м/с, волнение — 5 баллов) и работу пришлось прекратить. Судно-носитель приступило к подъему аппарата. В момент, когда глубина погружения КУРВ-3 составляла 180 м, кабель оборвался, и аппарат затонул. Предпринятые впоследствии поиски аппарата кораблями ВМС и Береговой охраны США успеха не принесли.

В августе 1973 г. аппарат «Пайсис-3» (водоизмещение 13,1 т, глубина погружения 914 м, скорость подводная 2,0 уз) прокладывал телефонный трансатлан-

тический кабель [169, с. 25]. Однажды при всплытии на поверхность с глубины 420 м в 150 милях юго-западнее порта Корк (Ирландия) аппарат задел трос, поддерживающий кабель, и повредил клапан вентиляции уравнительной цистерны. Выгородка электромасляного насоса цистерны заполнилась водой, и аппарат затонул. Компенсировать полученную значительную отрицательную плавучесть было нечем. Для экономии кислорода члены экипажа аппарата ограничили переговоры друг с другом и сохраняли неподвижность. Подъем «Пайсиса-3» был выполнен судами-носителями «Виккерс Вояжер» и «Джон Кэбот» с помощью трех аппаратов — двух обитаемых «Пайсис-2» и «Пайсис-5» и необитаемого КУРВ-3. Когда подъем был закончен и крышку люка открыли, выяснилось, что запаса кислорода в «Пайсисе-3» оставалось на 30 мин.

Вопросы, связанные с изучением воздействий различных факторов на элементы МПС и ПБС (например, подводного взрыва в результате воздействия различных видов оружия — артиллерийского, торпедного, ракетного и др.), носят, как отмечал профессор, д.т.н. Крючков Ю.С. в [49, с. 400–403; 50, с. 242–245; 71], как правило, закрытый характер.

Что касается воздействия природных явлений на МПС, таких как цунами, подводные извержения вулканов, смерчи, ураганы, данные вопросы рассмотрены в [11, 31, 48, 51, 52, 95, 193, 194].

Вопросы соударения опускаемых и буксируемых объектов с водной поверхностью рассмотрены в [16].

Задачи, связанные с указанными направлениями, решались различными исследователями как теоретически, так и экспериментально. Первые работы в этой области принадлежат основоположникам классической механики Леонардо да Винчи, Галилею, Гюйгенсу, Лейбницу [119]. Процесс динамического взаимодействия двух тел рассматривался как мгновенный, оценивался лишь конечный результат удара — изменение скоростей тел. Ньютон сформулировал основные законы механики и при рассмотрении удара впервые использовал понятие коэффициента восстановления.

При столкновениях элементов ПБС с ПО нагрузки в ГС могут увеличиваться в несколько раз, в связи с чем возникает потребность определения их максимальных значений и создания соответствующих математических моделей. В результате неравномерного растяжения ГС уменьшается их прочность, что приводит к уменьшению их срока эксплуатации [313]. В процессе длительной эксплуатации канаты МПС и ПБС получали большое остаточное удлинение (до 15–20 м на 1000 м и больше). Обрыв ГС часто ведёт к потере дорогостоящих ПБО [7, 105, 169].

Изучение таких воздействий на ПБС практически не производилось. Иногда такая необходимость возникает, когда нужно осуществлять поиск ПА, судов и самолётов, потерпевших крушение, несмотря на погодные условия, т.к. от оперативности таких поисков может зависеть жизнь потерпевших, выяснение причин катастрофы [301].

Рассмотрим случай, когда при буксировке ПБО, в качестве которого рассматривается привязной подводный аппарат (ППА), происходит столкновение (удар), например, спасательного подводного аппарата (ПА) с буксирным тросом в его

центральной части (рис. 4.15). В качестве судна-буксировщика на рис. 4.15 изображён морской тральщик (МТЩ) пр. 266М, а в качестве постороннего подводного объекта (ППО) — спасательный ПА пр. 1832 «Поиск-2» [177].

В зависимости от скорости буксировки ППА (а также массы судна-буксировщика) и скорости движения ППО в момент удара возможен либо кратковременный останов ПБС и дальнейшее замедленное движение ПБС, либо дальнейшее движение ПБС без замедления скорости (если масса встречного ППО незначительна), при этом будет происходить буксировка и ППО наряду с буксировкой ППА. При этом возможно запутывание буксирного троса, изменение его формы, обрыв. Это потребует остановки судна-буксировщика, подъёма ППА и ППО, если позволит мощность лебёдки судна-буксировщика, распутывания буксирного троса, ремонта ПБС, что в результате приведёт к невыполнению задачи. В случае, если масса встречного ПО будет значительной по сравнению с судном-буксировщиком, возможен обрыв буксирного троса, или даже утопление судна-буксировщика встречным ППО, например, как это произошло с японским сейнером, когда американская ПЛА попала в его трал. Буквально за считанные минуты сейнер был потоплен, погибли несколько рыбаков. ПЛА удалось освободиться от трала, при этом военно-морским флотом США всячески отрицалось участие в столкновении ПЛА ВМС США.

Значения динамического натяжения буксирного троса при ударе по нему в центральной части ППО определяются аналогично как и в п. 4.3.2 (см. ф–лы (4.21)–(4.45).

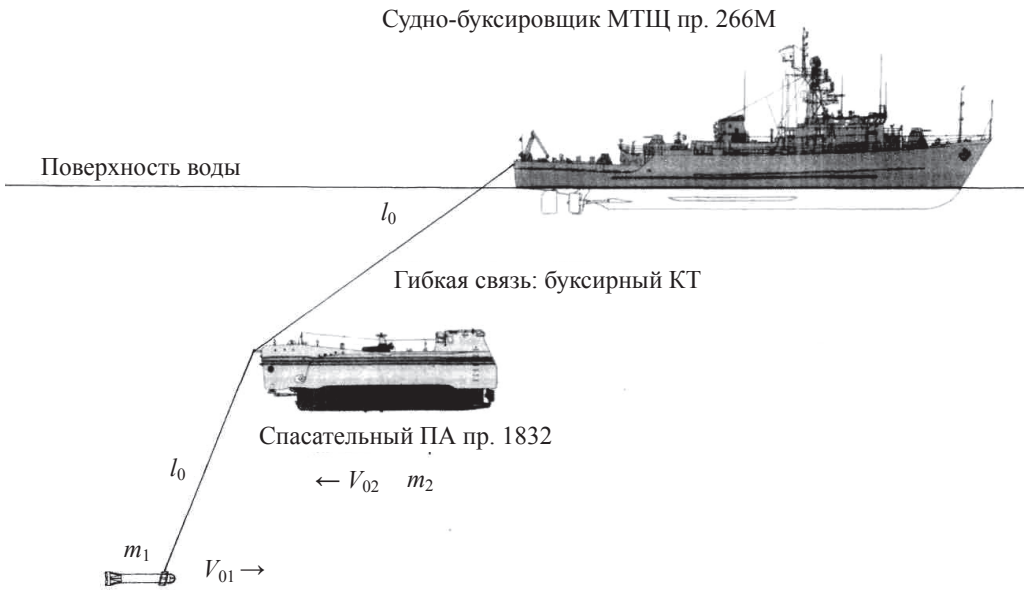


Рис. 4.15. Схема системы «надводное судно-буксировщик – буксирный трос – подводный буксируемый объект» в момент удара встречного ПО по буксирному тросу

Рассмотрим случай, когда при буксировке ПБО происходит столкновение, например, спасательного подводного аппарата (ПА) с буксирным тросом в произвольном месте. Определим усилия натяжения в ветвях троса и частоты колебаний.

На рис. 4.16 приведена схема действия сил в системе после удара ППО по буксирному тросу [426].

Обозначения на рисунке 4.16: x — вертикальное смещение точки x_0 в результате удара ППО по тросу; y — горизонтальное смещение точки y_0 в результате удара ППО по тросу; x_0 — вертикальная координата (глубина) точки удара по тросу; y_0 — горизонтальная координата точки буксировки на поверхности воды; s_{10}, s_{20} — верхняя и нижняя длины буксирного троса до удара; Δs_1, Δs_2 — приращения длин верхней и нижней частей троса после удара; α_1, α_2 — углы наклона верхней и нижней частей троса после удара; T_1, T_2 — усилия натяжения в верхней и нижней частях троса после удара; T_{10}, T_{20} — стартовые натяжения верхней и нижней частей троса по отношению к точке удара; ΔT_1, ΔT_2 — приращения T_1 и T_2 соответственно после удара.

Полагаем, что система «надводное судно-буксировщик – буксирный трос – буксируемый подводный объект» движется с постоянной скоростью. Дифференциальные уравнения динамики троса согласно принципу Даламбера представляются в виде [426]

$$\begin{aligned} mx_{t,t} &= -T_1 \cos(\alpha_1) + T_2 \cos(\alpha_2); \\ my_{t,t} &= -T_1 \sin(\alpha_1) - T_2 \sin(\alpha_2) + mg, \end{aligned} \tag{4.114}$$

где T_1, T_2 — натяжения в ветвях троса, α_1, α_2 — углы наклона концов троса.

Натяжения в ветвях троса будут равны

$$\begin{aligned} T_1 &= T_{10} + \Delta_{T_1}; \\ T_2 &= T_{20} + \Delta_{T_2}. \end{aligned} \tag{4.115}$$

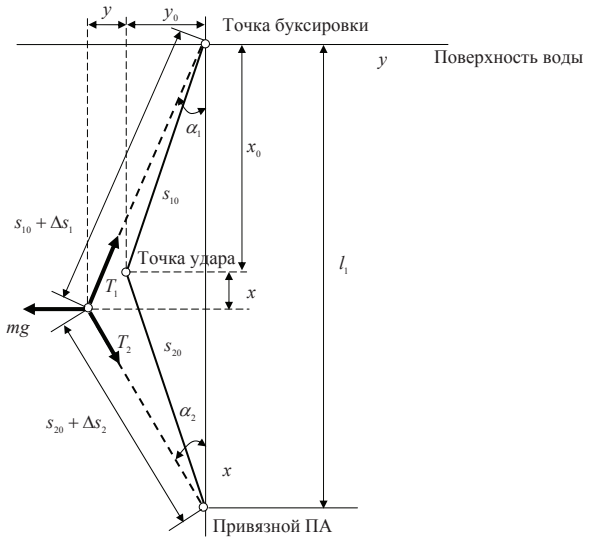


Рис. 4.16. Схема действия сил в системе в после удара ППО по буксирному тросу

Подстановка этих натяжений в дифференциальные уравнения движения с последующим разложением в ряд Маклорена и сохранением линейных слагаемых позволяет получить уравнения:

$$mx_{t,t} = -\frac{xT_{10}}{s_{10}} + \frac{l_1T_{20}}{s_{20}} - \frac{T_{10}x_0}{s_{10}} - \frac{xT_{20}}{s_{20}} - \frac{T_{20}x_0}{s_{20}} + \left(\frac{l_1}{s_{20}} - \frac{x}{s_{20}} - \frac{x_0}{s_{20}}\right)\Delta_{T_2} +$$
$$+\left(\frac{T_{20}x_0}{s_{20}^2} - \frac{l_1T_{20}}{s_{20}^2} + \frac{xT_{20}}{s_{20}^2}\right)\Delta_{s_2} + \left(-\frac{x}{s_{10}} - \frac{x_0}{s_{10}}\right)\Delta_{T_1} + \left(\frac{T_{10}x_0}{s_{10}^2} + \frac{xT_{10}}{s_{10}^2}\right)\Delta_{s_1} -$$
$$-\frac{T_{10}(y_0+y)}{s_{10}} + gm + \frac{T_{20}(y_0+y)}{s_{20}} + \frac{T_{10}(y_0+y)\Delta_{s_1}}{s_{10}^2} - \frac{T_{20}(y_0+y)\Delta_{s_2}}{s_{20}^2} -$$
$$-\frac{\Delta_{T_1}(y_0+y)}{s_{10}} + \frac{\Delta_{T_2}(y_0+y)}{s_{20}}; \qquad (4.116)$$

$$my_{t,t} = gm - \frac{yT_{10}}{s_{10}} + \frac{T_{20}y_0}{s_{20}} - \frac{T_{10}y_0}{s_{10}} + \frac{yT_{20}}{s_{20}} + \left(\frac{y}{s_{20}} + \frac{y_0}{s_{20}}\right)\Delta_{T_2} +$$
$$+\left(-\frac{yT_{20}}{s_{20}^2} - \frac{T_{20}y_0}{s_{20}^2}\right)\Delta_{s_2} + \left(-\frac{y}{s_{10}} - \frac{y_0}{s_{10}}\right)\Delta_{T_1} + \left(\frac{T_{10}y_0}{s_{10}^2} + \frac{yT_{10}}{s_{10}^2}\right)\Delta_{s_1}. \qquad (4.117)$$

Учитывая удлинения ветвей и очевидные геометрические соотношения, статические натяжения находим как решение системы уравнений:

$$-\frac{xT_{10}}{s_{10}} + \frac{l_1T_{20}}{s_{20}} - \frac{T_{10}x_0}{s_{10}} - \frac{xT_{20}}{s_{20}} - \frac{T_{20}x_0}{s_{20}} = 0;$$
$$gm = \frac{yT_{10}}{s_{10}} - \frac{T_{10}y_0}{s_{10}} + \frac{yT_{20}}{s_{20}} + \frac{T_{20}y_0}{s_{20}}. \qquad (4.118)$$

Имеем

$$T_{10} = \frac{gms_{10}(-l_1 + x_0 + x)}{2x_0y_0 + 2xy_0 + l_1y - l_1y_0}; \qquad (4.119)$$

$$T_{20} = \frac{s_{20}mg(x_0 + x)}{2x_0y_0 + 2xy_0 + l_1y - l_1y_0}. \qquad (4.120)$$

Окончательно уравнения движения принимают вид

$$x_{t,t} + a_{11}x + a_{12}y = 0; \qquad (4.121)$$
$$y_{t,t} + a_{21}x + a_{22}y = 0, \qquad (4.122)$$

где

$$a_{11} = \frac{{y_0}^2}{m}\left(\frac{T_{10}}{{s_{10}}^3} + \frac{T_{20}}{{s_{20}}^3}\right) + \frac{EF}{m}\left(\frac{x_0^2}{{s_{10}}^3} + \frac{(l_1 - x_0)^2}{{s_{20}}^3}\right), \qquad (4.123)$$

$$a_{12} = a_{21} = \frac{EFy_0}{m}\left(\frac{x_0}{{s_{10}}^3} - \frac{(l_1 - x_0)}{{s_{20}}^3}\right) - \frac{y_0}{m}\left(\frac{T_{10}x_0}{{s_{10}}^3} - \frac{T_{20}(l_1 - x_0)}{{s_{20}}^3}\right), \quad (4.124)$$

$$a_{22} = \frac{1}{m}\left(\frac{T_{10}x_0^2}{{s_{10}}^3} + \frac{T_{20}(l_1 - x_0)^2}{{s_{20}}^3}\right) + \frac{EF{y_0}^2}{m}\left(\frac{1}{{s_{10}}^3} + \frac{1}{{s_{20}}^3}\right). \quad (4.125)$$

Частоты колебаний для $x(t) = A\sin(pt)$, $y(t) = B\sin(pt)$ равны

$$p_{1,2} = \sqrt{\frac{a_{11} + a_{22}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_{11} + a_{22}}{2}\right)^2 + {a_{12}}^2}}. \quad (4.126)$$

Последовательная линеаризация уравнений модели позволила получить удобные для практических расчетов выражения движения, усилий натяжения в ветвях и частоты колебаний буксировочного троса. Научная новизна данного исследования заключается в новом подходе определения значения натяжений T_1 и T_2 в ветвях троса при ударе по нему ППО в произвольном месте, углы наклона α_1 и α_2 концов троса, частоты колебаний $p_{1,2}$ для уравнений *x(t)* и *y(t)*, что позволяет усовершенствовать методику проектирования ГС МПС и ПБС в условиях ударных нагрузок при аварийном режиме эксплуатации.

Для проверки применимости разработанной компьютерной программы описания динамики МПС с ГС [432] для данной задачи принимаем следующие параметры МПС: длина ГС 100 м, её диаметр 14 мм, модуль Юнга $9{,}55\cdot10^8$ Па, погонная масса 0.15386 кг/м. Нормальный коэффициент гидродинамического сопротивления ГС равен 1,8, а тангенциальный — 0,025. В начальный момент времени ГС, СН и ПА находятся в состоянии покоя. ГС расположена вертикально и имеет форму прямой линии. Её натяжение (T) равно нулю. СН и ПА могут перемещаться в пространстве в результате столкновения с объектом массой m_2 (морским животным, рыбой или моллюском либо другим ППО), который движется с начальной скоростью V_0 перпендикулярно к ГС в заданной точке ГС. Необходимо определить влияние положения точки столкновения морского объекта с ГС на силу её натяжения возле СН и ПА.

Параметры СН и ПА и морского объекта заданы в рабочем окне программы, показанном на рис. 4.17.

В процессе моделирования предполагали, что морской объект массой 10 т остаётся связанным с ГС (не освобождается от неё) в течение всего времени её движения как в положительном, так и в отрицательном направлении. Результаты математического моделирования показывают, что форма ГС в процессе взаимодействия с ППО существенно зависит от положения точки удара.

Для случая 1 в табл. 4.8 приведены этапы изменения формы ГС в результате удара по ней на расстоянии 50 метров от СН и ПА. Из таблицы 4.8 следует, что разная масса и размеры СН и ПА приводят к всплытию морского объекта на глубину от 50 до 20 метров и последующее погружение в результате его торможения СН.

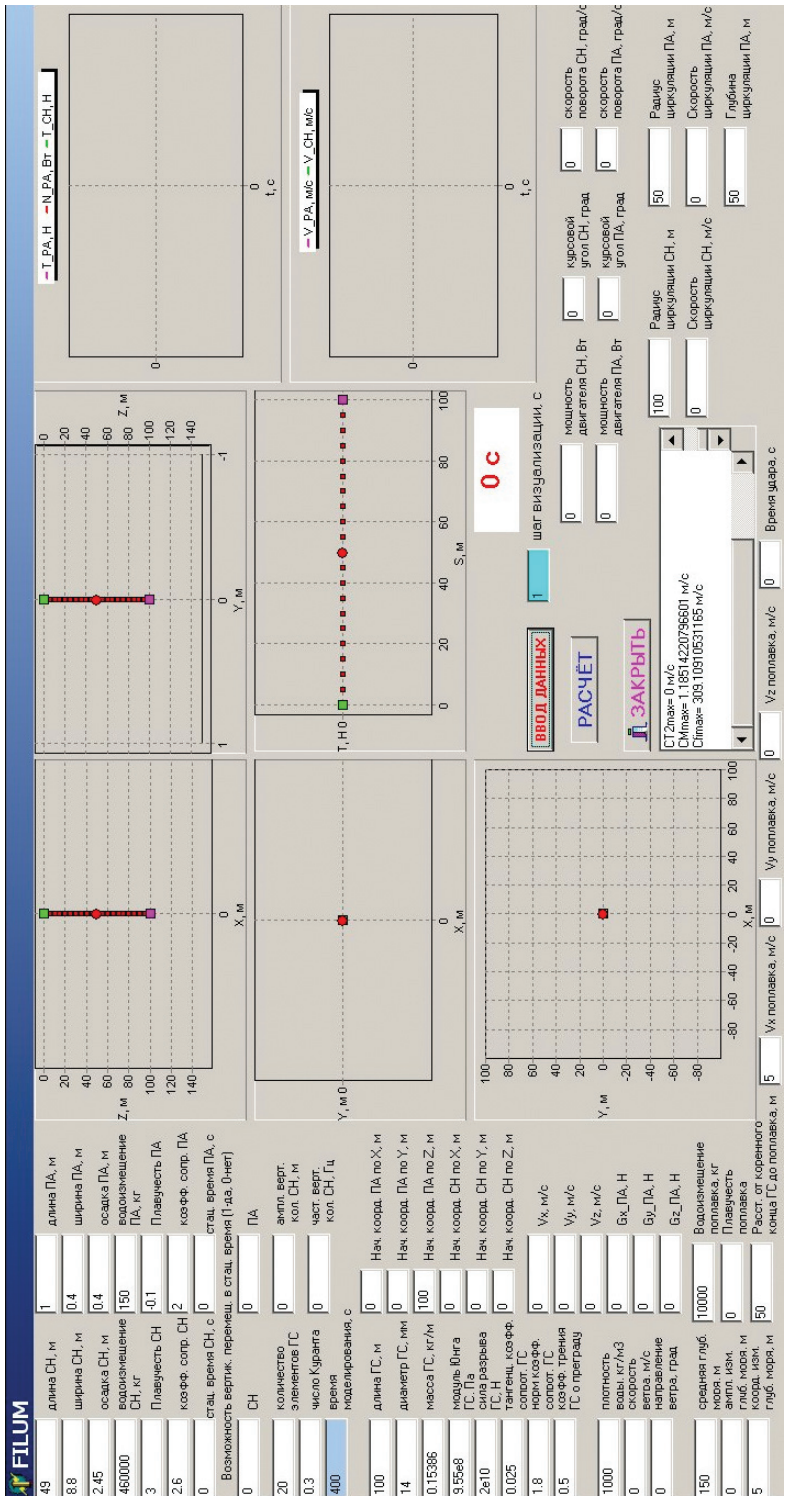
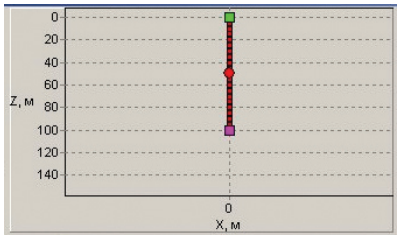
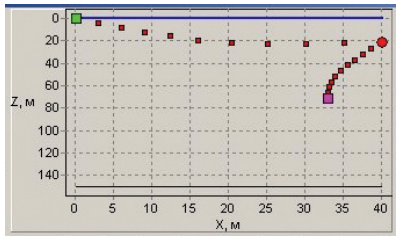
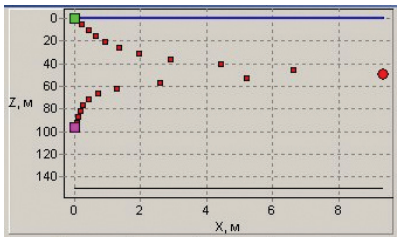
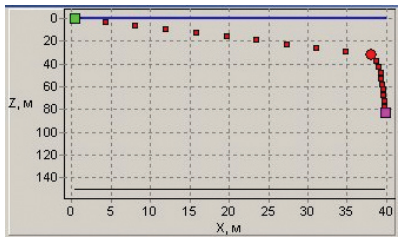
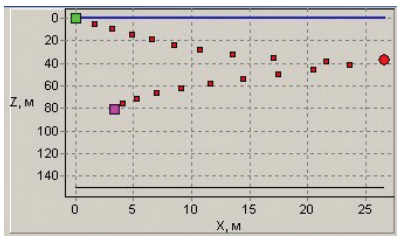
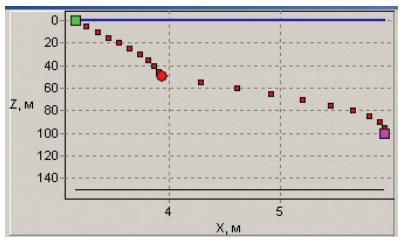
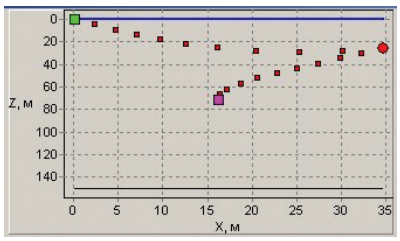
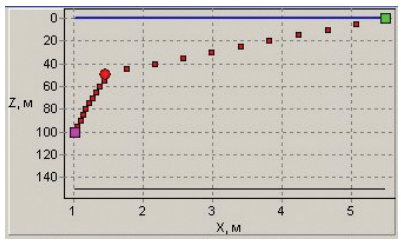


Рис. 4.17. Начальный вид окна программы

Таблица 4.8. Изменение формы ГС ПБС в процессе моделирования

*t**, с	Форма ГС	*t**, с	Форма ГС
1	2	1	2
0		59	
2		92	
12		238	
26		338	

Примечание: *t** — момент времени

В дальнейшем морской объект изменяет направление своего движения на противоположное, увлекая за собой ПА. ГС получает наибольшее натяжение 4,1 кН возле СН (рис. 4.17). СН к 338 секунде также получает перемещение 5,5 м. ПА движется с переменной скоростью, максимум модуля которой достигает 2,5 м/с. Смещение точки удара морского объекта по ГС в сторону СН (на расстоянии 25 м от него) существенно изменяет кинематику движения МПС (табл. 4.9 и рис. 4.18), а также силовое воздействие на СН и ПА (рис. 4.18).

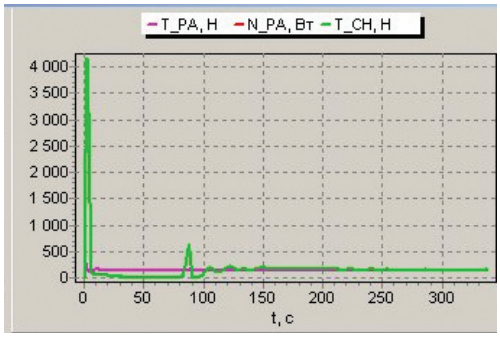


Рис. 4.17. Изменение силы натяжения ГС возле СН и ПА в результате удара по ней на расстоянии 50 метров от СН и ПА

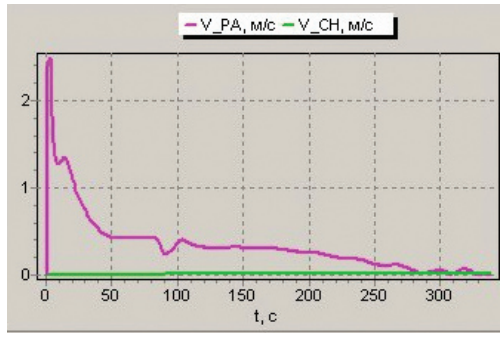


Рис. 4.18. Изменение модуля скорости СН и ПА в результате удара по ГС на расстоянии 50 метров от СН и ПА

Для случая 2 в табл. 4.9 приведены этапы изменения формы ГС в результате удара по ней на расстоянии 25 метров от СН.

На рис. 4.19 и 4.20 приведены изменение модуля скорости СН и ПА и силы натяжения ГС возле СН и ПА в результате удара по ГС на расстоянии 25 метров от СН.

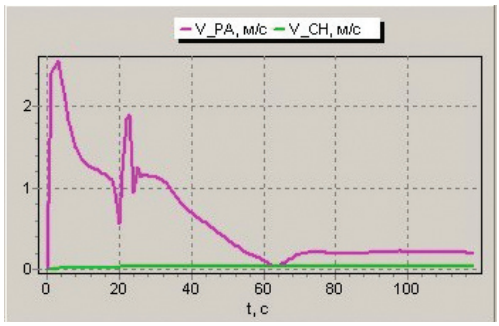


Рис. 4.19. Изменение модуля скорости СН и ПА в результате удара по ГС на расстоянии 25 метров от СН

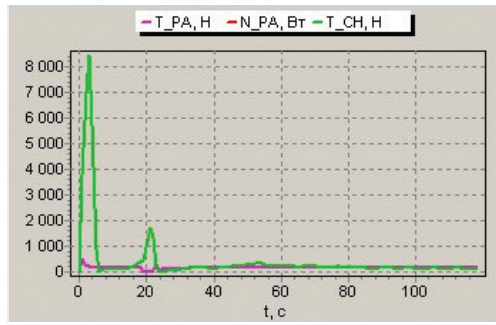
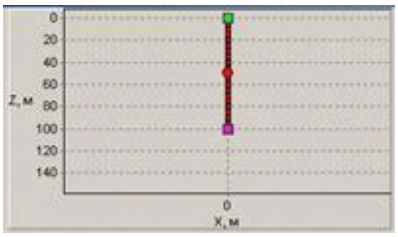
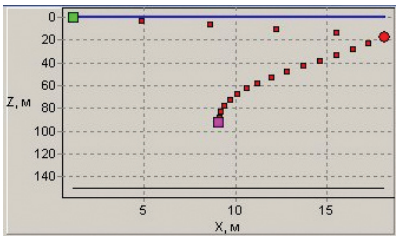
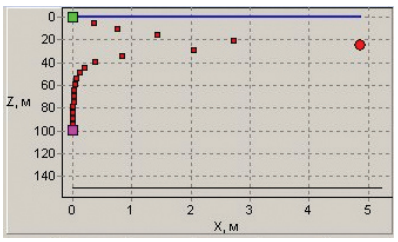
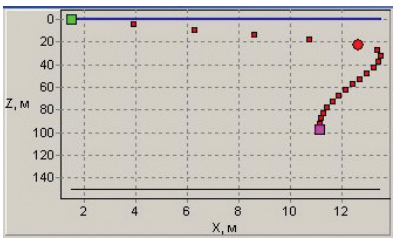
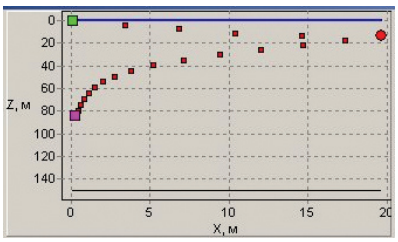
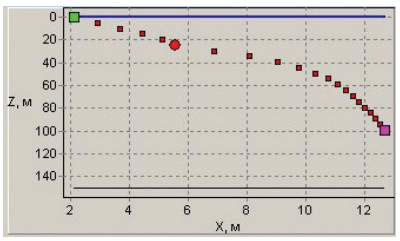
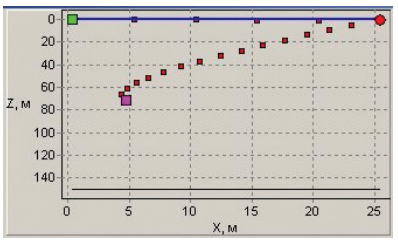
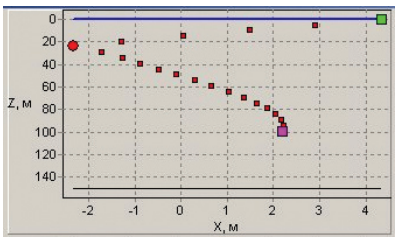


Рис.4.20. Изменение силы натяжения ГС возле СН и ПА в результате удара по ней на расстоянии 25 метров от СН

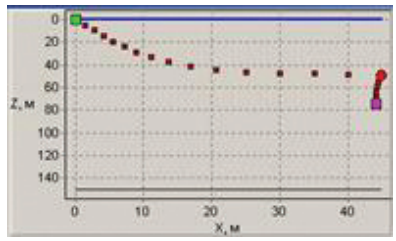
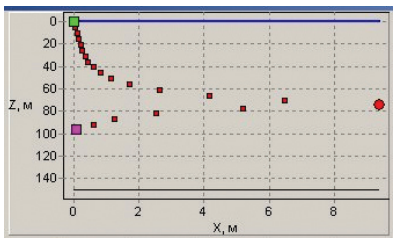
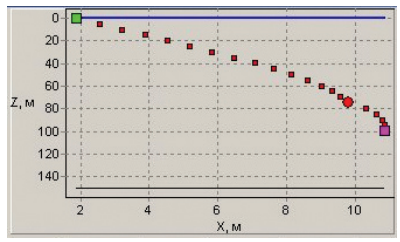
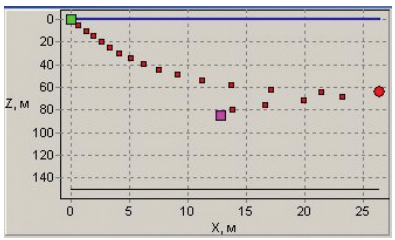
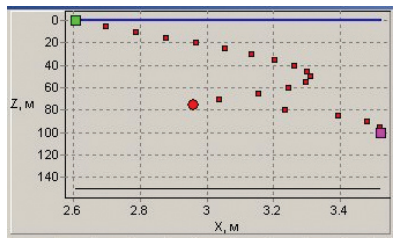
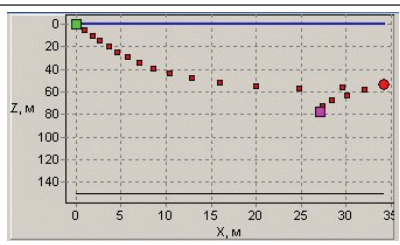
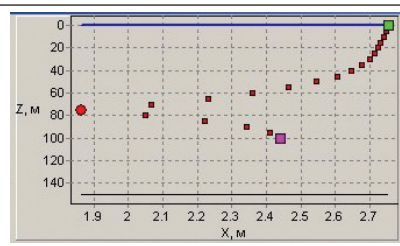
Таблица 4.9. Изменение формы ГС ПБС в процессе моделирования

*t**, с	Форма ГС	*t**, с	Форма ГС
0		40	
1		50	
8		65	
20		118	

Примечание: *t** — момент времени

Для случая 3 в табл. 4.10 изменение формы ГС в результате удара по ней на расстоянии 75 метров от СН.

Таблица 4.10. Изменение формы ГС ПБС в процессе моделирования

t^*, с	Форма ГС	t^*, с	Форма ГС
0		64	
2		216	
11		251	
22		258	

Примечание: t^* — момент времени

Смещение точки удара морского объекта по ГС в сторону ПА (на расстоянии 75 м от СН) существенно изменяет кинематику движения МПС (см. табл. 4.10 и рис. 4.21).

То же происходит и для силового воздействия на СН и ПА (рис. 4.22).

Можно отметить, что чем ближе удар морского объекта к СН, тем больше сила натяжения ГС. Однако, на силу натяжения ГС влияет не только положение точки удара, но и подвижность СН и ПА (рис. 4.23).

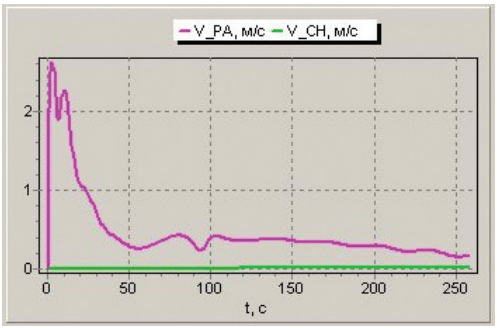


Рис. 4.21. Изменение модуля скорости СН и ПА в результате удара по ГС на расстоянии 75 метров от СН

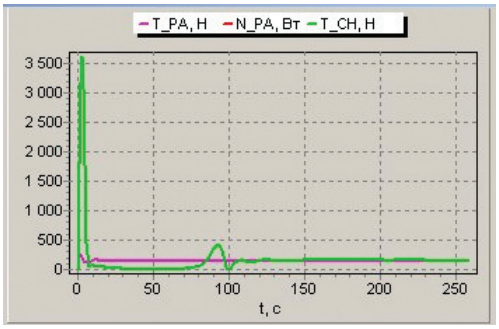


Рис. 4.22. Изменение силы натяжения ГС возле СН и ПА в результате удара по ней на расстоянии 75 метров от СН

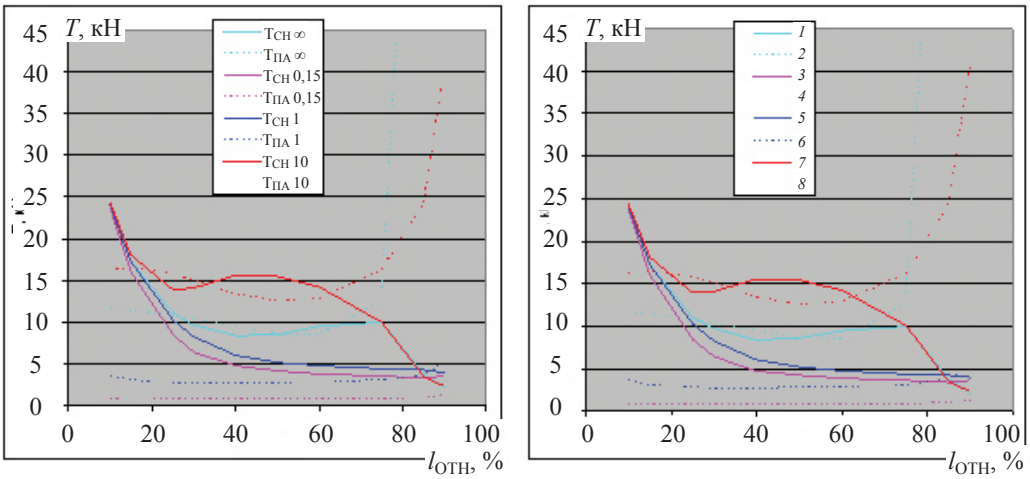


Рис. 4.23. Зависимость силы натяжения ГС от относительного расстояния от СН:
сплошные линии — натяжение коренного конца ГС (возле СН), а пунктирные — ходового; линии *1* и *2* — СН и ПА неподвижны, *3* и *4* — масса ПА 0,15 т, *5* и *6* — масса ПА 1 т, *7* и *8* — масса ПА 10 т

Масса СН намного больше ПА и морского объекта и, следовательно, его подвижность очень мала. Поэтому приближение точки удара к СН, независимо от массы ПА (от 0,15 до 10 т), практически не изменяет силу натяжения коренного конца ГС возле СН, но натяжение ходового конца ГС возле ПА существенно возрастает с увеличением массы ПА.

Приближение точки удара морского объекта к ПА уменьшает силу натяжения ГС возле СН, но увеличивает её вблизи ПА. Если ПА неподвижен, тогда натяжение ГС вблизи ПА неограниченно возрастает, что приводит к её разрыву. В целом, удар посередине ГС наиболее безопасен по величине её натяжения. Увеличение массы ПА приводит к немонотонному изменению натяжения коренного конца ГС.

Научная новизна данного исследования заключается в том, что, используя разработанную компьютерную программу описания динамики ГС МПС для ПБС, можно определить модули скорости СН и ПА при ударе по нему ППО в произвольном месте, что позволяет усовершенствовать методику проектирования ГС МПС и ПБС в условиях ударных нагрузок при аварийных режимах.

Автор, исследуя вопросы, связанные с изучением воздействий различных факторов на элементы МПС и ПБС, осуществил поиск подобных материалов в библиотеках и сети Интернет, и обнаружил, что они практически не изучены. Изучение таких воздействий на ГС МПС, ППС и ПБС практически не производилось либо результаты являются закрытыми.

4.3.4. Аварийный режим торможения судна-носителя подводной буксируемой системы

Манёвр аварийный — вынужденное изменение курса или скорости судна, предпринятое капитаном при отсутствии иного выхода для предупреждения столкновения. Иногда называют «маневром последнего момента» [193, с. 409]. Аварийное торможение — маневр судна, связанный с гашением его скорости и инерции при непосредств. опасности столкновения с др. судном, береговым сооружением или посадки на мель. Выполняется с помощью спец. тормозных устройств или реверсирования главного двигателя на полный ход назад с одноврем. отдачей якорей [193, с. 12].

Режим хода судна (искусств.) — градация скорости судна на неск. ступеней: самый малый, малый, средний, полный, самый полный ход (при работе гл. двигателя как вперед, так и назад) [194, с. 176]. Полный ход соответствует 100 % техн. скорости судна, средний — 70–75 % скорости полного хода, малый — 40–45 %, самый малый — 28–30 %, самый полный ход — 110–112 %. Самый полный ход вперед или назад дается только в крайних аварийных случаях на непродолжительный промежуток времени. При плавании в условиях ограниченной видимости в стесненных для маневрирования водах, при швартовке и движении по акватории портов работа гл. двигателей осуществляется в маневренном режиме, к-рый наиболее благоприятен для реверсирования двигателя, изменения скорости и направления движения судна. При этом режиме гл. двигатель и машинная вахта должны быть готовы к немедл. реверсированию двигателя по команде с мостика. Маневрирование режимами хода судна на всех ступенях скорости на 20–30 % меньше обычного режима хода судна. Таблица режимов хода судна устанавливает соответствие между частотой вращения винта и скоростью судна, составляется на осн. ходовых испытаний судна для обычного (полного, сред., малого хода вперед и назад) и маневр. режимов работы гл. двигателя и входит в таблицу информац. данных судна по маневр. элементам.

Тормозной путь судна, расстояние, проходимое судном по инерции после реверса главного двигателя с полного хода вперед на полный ход назад или поворота лопастей ВРШ [194, с. 332], зависит от первоначальной скорости движения, водоизмещения судна, времени реверса и мощности двигателя на заднем ходу.

Увеличение водоизмещения судна в 2 раза приводит к возрастанию тормозного пути и времени торможения примерно в 1,5 раза (тормозной путь супертанкера достигает 2 миль и более). Тормозной путь уменьшается при увеличении мощности гл. двигателя на заднем ходу, причем она может быть использована полностью при установке ВРШ, время реверса в этом случае значительно уменьшается. На тормозной путь могут также значительно повлиять гидрометеорологические условия плавания. Тормозной путь определяют на ходовых испытаниях судна для различных режимов хода (средний, малый ход вперед и назад). Тормозные характеристики судна содержатся в таблице маневренных элементов. Тормозной путь иногда выражают в долях длины корпуса судна.

4.3.5. Режим циркуляции судна-носителя с подводной буксируемой системой

Циркуляция судна — траектория центра тяжести судна, шедшего ранее прямым курсом, в результате перекладки руля на некоторый постоянный угол и прохождение судном этой траектории [218, с. 645]. Циркуляция судна разбивается на три периода: манёвренный, в течение которого происходит перекладка руля (при руле, переложенном на борт, этот период продолжается 10–15 сек.); эволюционный, в течение которого изменяются координатные параметры судна (угол дрейфа, угловая скорость, линейная скорость), заканчивающийся после изменения угла курса судна на 90°; установившаяся циркуляция, в продолжение которой координатные параметры остаются неизменными. Траектория при этом представляет собой правильную окружность с диаметром D (рис. 4.24) [194, с. 407].

При руле, переложенном на борт (на максимальный угол, равный ок. 35°), диаметр установившейся циркуляции составляет в среднем 4–6 длин судна и является мерой поворотливости судна. Геометрически циркуляция судна характеризуется: тактическим диаметром $D_т$, составляющим до 1,1 D; выдвигом l_1 от 0,6 D до 1,2 D; прямым смещением l_2 от 0,25 D до 0,5 D и обратным смещением l_3 от 0,0 до 0,1 D.

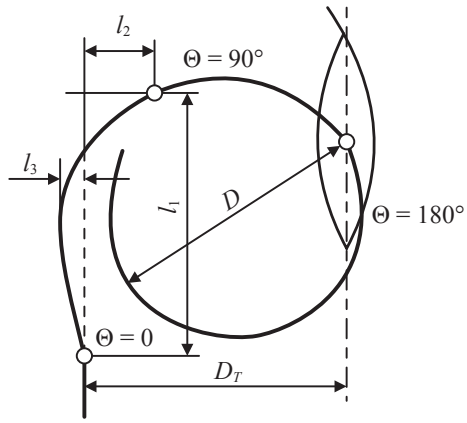


Рис. 4.24. Траектория и основные параметры циркуляции судна

На каждом судне имеются экспериментальные данные об элементах циркуляции судна, определённые при разных скоростях судна и разных углах перекладки рулей, т. к. без знания элементов циркуляции судна невозможно ведение прокладок, особенно при маневрировании. Циркуляции судна сопутствуют такие явления, как падение скорости при неизменной мощности главных двигателей и крен судна. На рис. 4.25 приведено фото тральщика на циркуляции [381, с. 70].

В гл. 11 [136, с. 155] рассмотрены расчёты параметров движения буксируемых систем при манёврах судна. Как отмечают Поддубный В. И., Шамарин Ю. Е., Черненко Д. А., Астахов Л. С. [136, с. 155], при движении судна с переменной скоростью БС изменяет глубину хода, что приводит к появлению существенных динамических составляющих натяжения кабель-буксира, неустойчивых режимов движения БН. Поскольку для большинства систем нормальными условиями эксплуатации является буксировка с постоянной скоростью, а движение с ускорением представляет собой переход от одной фиксированной скорости к другой, то весьма важно знать длительность переходного процесса, связанного с изменением глубины хода БН (ДНА). Они отмечают также, что подобные расчеты динамических параметров становятся практикой проектирования, что существенно повышает уровень представлений разработчика о режимах движения судна, необходимых для эффективного функционирования аппаратуры.

Проведенные расчеты параметров движения системы кабель-буксир – БН (сферической формы) при мгновенном изменении скорости показали, что в начальный момент движения с положительным ускорением натяжение кабель-буксира резко возрастает, а затем убывает до соответствующего буксировке с вновь приобре-



Рис. 4.25. Циркуляция тральщика M645 [381, с. 70]

тенной скоростью. БН постепенно уменьшает глубину хода, а спустя несколько минут БС приходит в равновесное положение, эквивалентное новой скорости буксировки [136, с. 156]. Нестационарные режимы БН с развитой несущей поверхностью, как следует из экспериментальных данных, могут существенно отличаться от только что описанных значительными угловыми колебаниями БН, которые вызывают колебания БН по глубине относительно траектории, характерной для БН без развитой несущей поверхности.

Для сравнительно длинных БС, в частности БС с длинномерными носителями аппаратуры (ДНА) [136, с. 158], характерным является запаздывание, с которым ДНА реагирует на маневр судна-буксировщика. Величина запаздывания возрастает с увеличением длины БС. При этом ДНА в течение некоторого промежутка времени сохраняет глубину хода и направление движения, соответствующие предыдущему режиму буксировки.

Другой нестационарный режим движения БС на прямом курсе обусловлен неравномерностью хода буксировщика, движением с периодически изменяющейся скоростью. Указанный режим движения отличается от продольно-горизонтальной качки буксировщика большим периодом колебаний скорости буксировщика около некоторого среднего значения. С увеличением периода колебаний скорости буксировщика, когда его величина становится соизмеримой с отрезком времени, в течение которого реализуется переходный процесс изменения глубины хода ДНА, амплитуды поперечных колебаний ДНА заметно возрастают по сравнению с амплитудами колебаний, обусловленными продольно-горизонтальной качкой буксировщика.

Движение ДНА под некоторым углом к потоку при нестационарных режимах буксировки может приводить к вибрациям, обусловленным срывом вихрей, являющимся источником помех. Поэтому строгое обеспечение постоянной скорости буксировщика на прямом курсе может значительно повышать эффективность работы БС.

Расчёты параметров движения при переходе с прямого курса на циркуляцию и наоборот приведены в [136, с. 159–168]. При маневрах буксировщика важно знать ориентацию носителя аппаратуры относительно судна. Расчеты по приведенной ниже методике позволяют исключить из судового оборудования сложные приборы для определения координат носителя аппаратуры в различные промежутки времени. Результаты расчетов параметров движения БС с ДНА длиной около 750 м (ГК длиной 500 м, $V = -3$ м/с, $R_0 \approx L_{БС}$) в начальный момент перехода с прямого курса на циркуляцию показывают, что ДНА с существенным запаздыванием реагирует на маневр судна, сохраняя некоторое время прямолинейное движение при маневрах буксировщика. Затем ДНА приобретает форму элемента спирали, перемещающейся внутрь траектории движения буксировщика. В данном случае после $W_t/L_{bc} \sim 0{,}8$ перемещения БС в подвижной системе координат практически отсутствуют, т. е. переходный процесс на этом заканчивается, а БС движется в режиме установившейся циркуляции. Проведенные расчеты показали, что длительность выхода БС на установившуюся циркуляцию определяется длиной БС [136, с. 163].

При проектировании ПБС важное значение приобретают расчёты параметров движения буксируемых систем (БС) при манёврах судна, т.к. при движении судна с переменной скоростью БС изменяет глубину хода, что приводит к появлению существенных динамических составляющих натяжения кабель-буксира и неустойчивых режимов движения БС [136, с. 155]. Разработанные математическая модель динамики ГС МПС [430, 432] и алгоритм математической модели [391, 392, 431], компьютерная модель описания ГС [392, 434] позволяют проектанту МПС, имеющих в своём составе ГС, более качественно и оперативно проектировать практически все классы МПС. На основе алгоритма математической модели разработана компьютерная модель описания гибких связей подводных буксируемых систем.

Одним из таких сложных манёвров судна является режим циркуляции. Рассмотрим пространственное нестационарное движение привязной системы, состоящей из СН, ГС и подводного аппарата ПА, которое моделировали с помощью компьютерной программы, созданной на основе разработанной математической модели и алгоритма [434]. Данные расчёты являются своего рода тестированием компьютерной программы модели динамики МПС с ГС [394, 435]. Во всех случаях задавали массу ПА равной 150 кг, его плавучесть считали нейтральной, а коэффициент гидродинамического сопротивления равным 1. Начальную длину ГС задавали равной 100 м, её диаметр равным 14 мм. Из условия нейтральной плавучести ГС её погонную массу задавали равной 0,15386 кг/м. ГС считали упругой, задавая модуль Юнга её материала равным $9{,}55 \cdot 10^8$ Па. ГС делили на 20 элементов. Нормальный коэффициент сопротивления каждого элемента ГС принимали равным 1,8, а тангенциальный — 0,025. Координаты начального положения ПА по отношению к СН задавали из условия, что длина ГС, имеющей прямолинейную форму, будет равна 100 м. Затем по специально разработанному алгоритму перемещали ПА в заданную точку пространства, выполняя моделирование движения ГС. Таким образом, определяли начальную форму ГС, при которой начинали моделировать движение привязной системы, чтобы не задавать её форму искусственно. Для упрощения моделирования движения привязной системы и наглядности представления полученных результатов использовали принцип «обращения воздействия», когда элементы системы считали неподвижными, а на них набегал поток воды со скоростью, равной скорости движения СН и противоположной по направлению. Рассмотрим несколько вариантов движения СН с ПБС на режиме циркуляции.

Вариант 1. СН движется по прямой в направлении оси X со скоростью 1 м/с (рис. 4.26).

Несамоходный ПА в начальный момент времени $t = 0$ находится в точке A с координатами: X = 70,7 м; Y = 50 м; Z = 50 м. До 95 с ПА перемещается по специальному алгоритму в начальную точку B с координатами: X = 0; Y = 50 м; Z = 50 м. После 95 с ПА начинает движение за СН до выхода на установившийся режим. На рис. 4.27 показано изменение формы ГС, соединяющей СН и ПА в процессе движения СН в проекциях на плоскости X0Y и X0Z. Линии ГС на рис. 4.27 обозначены моментами времени, на которые ГС приобрела соответствующую форму.

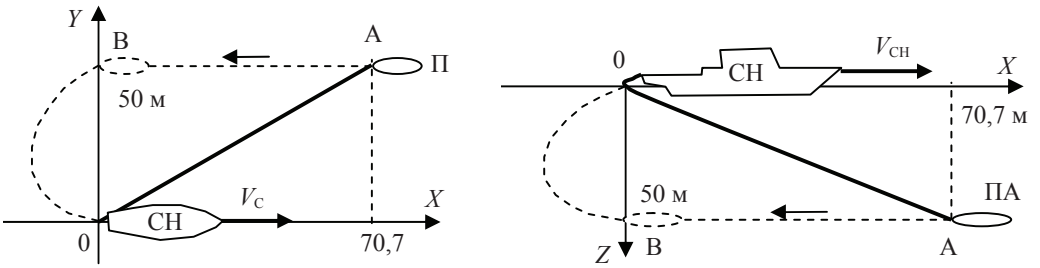


Рис. 4.26. Схема движения СН с БПА

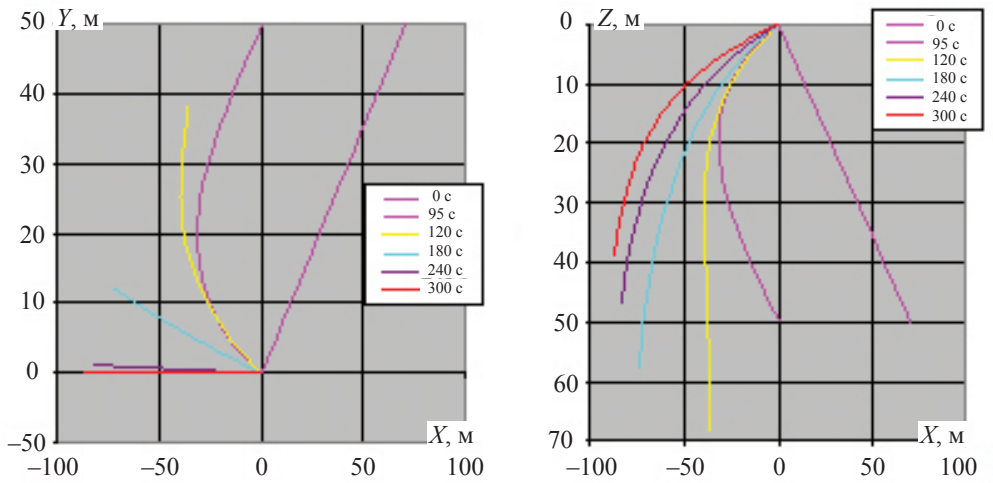


Рис. 4.27. Изменение формы ГС в проекциях на плоскости X0Y и X0Z

Изменение силы натяжения ГС, действующей на СН и ПА, показано на рис. 4.28 соответственно зелёной и лиловой линиями. Как следует из данных, приведённых на рис. 4.27 и 4.28, процесс эволюции привязной системы к 300 с завершается её переходом к стационарному состоянию, после которого форма ГС, а также силы, действующие на СН и ПА, не изменяются.

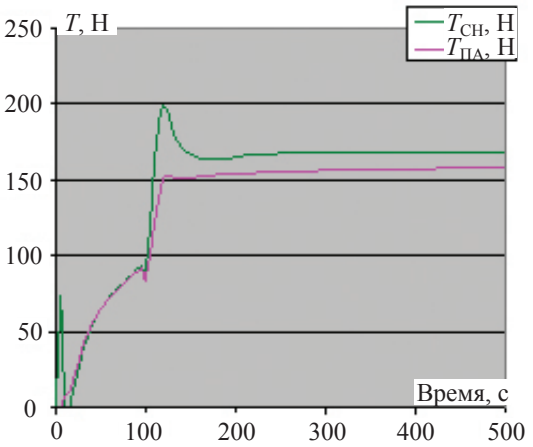


Рис. 4.28. Изменение силы натяжения ГС, действующей на СН и ПА

Вариант 2. СН неподвижно, а ПА движется вокруг него по окружности радиусом 50 м со скоростью 0,5 м/с на глубине 50 м, используя собственный двигатель (рис. 4.29).

На рис. 4.30 показано изменение формы ГС, соединяющей СН и ПА, в процессе движения ПА в проекциях на плоскости X0Y и X0Z.

Линии ГС обозначены моментами времени, на которые ГС приобрела соответствующую форму. Изменение силы натяжения ГС, действующей на СН и ПА, показано на рис. 4.31 соответственно зелёной и лиловой линиями. На этом же рисунке красной линией показана мощность движителя ПА в разные моменты времени. Разделив эту мощность на КПД двигателя ПА, можно определить его мощность. Натяжение ГС и мощность движителя после переходного процесса от точки B (рис. 4.26) выходят на режим установившихся колебаний относительно малой амплитуды, вызванных пробегом поперечных и продольных волн в ГС (рис. 4.31).

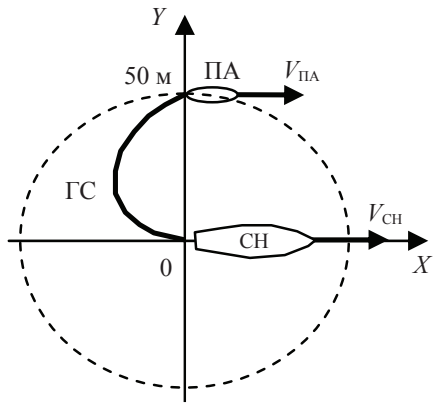


Рис. 4.29. Схема движения ПА вокруг СН по окружности

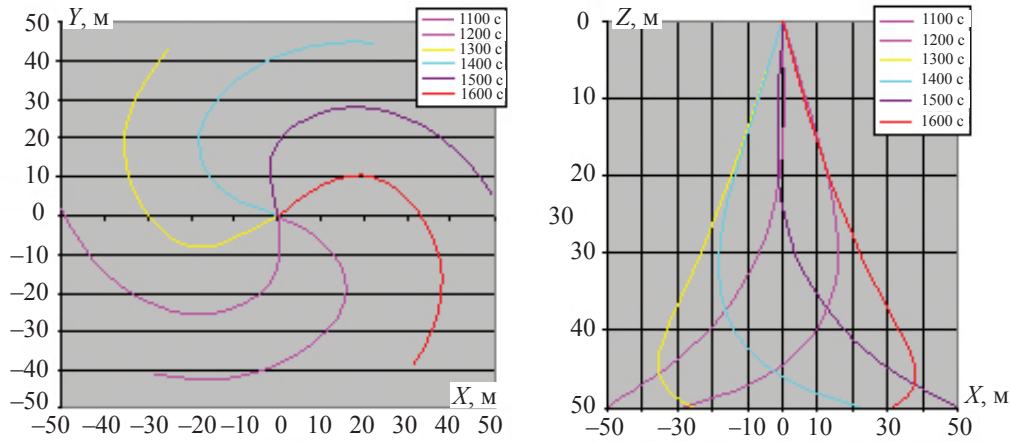


Рис. 4.30. Изменение формы ГС в проекциях на плоскости X0Y и X0Z

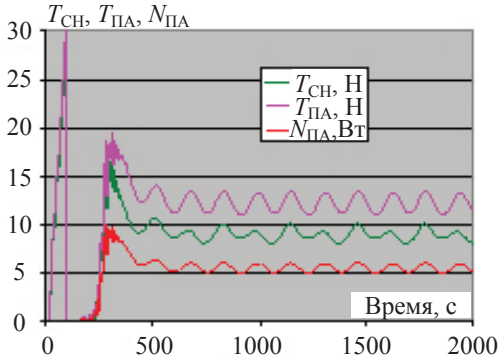


Рис. 4.31. Изменение силы натяжения ГС, действующей на СН и ПА

Вариант 3. СН движется в направлении оси X со скоростью 0,5 м/с, а ПА движется вокруг него по окружности радиусом 50 м со скоростью 0,5 м/с на глубине 50 м, используя собственный двигатель (рис. 4.32).

На рис. 4.33 показано изменение формы ГС, соединяющей СН и ПА, в процессе движения ПА в проекциях на плоскости X0Y и X0Z.

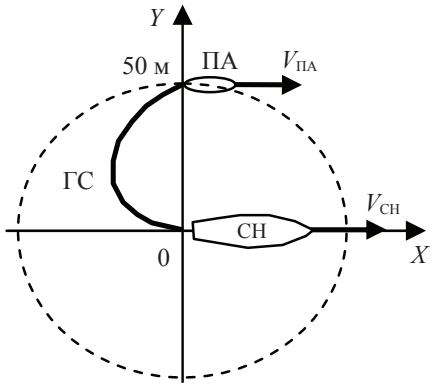


Рис. 4.32. Схема движения ПА вокруг СН по окружности

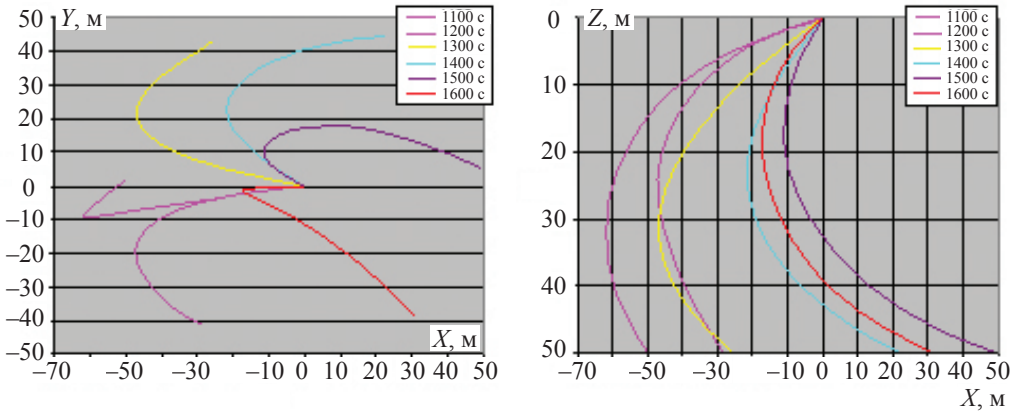


Рис. 4.33. Изменение формы ГС в проекциях на плоскости X0Y и X0Z

Линии ГС обозначены моментами времени, на которые ГС приобрела соответствующую форму. В абсолютной системе координат ПА движется по сложной «петлеобразной» траектории, поэтому форма ГС непрерывно изменяется.

Изменение силы натяжения ГС, действующей на СН и ПА, показано на рис. 4.34 соответственно зелёной и лиловой линиями.

На этом же рисунке красной линией показана мощность движителя ПА в разные моменты времени. Разделив эту мощность на КПД двигателя ПА, можно определить его мощность. Натяжение ГС и мощность движителя после переходного процесса от точки В выходят на режим установившихся колебаний большой амплитуды (по сравнению с вариантом 2), вызванных пробегом поперечных и продольных волн в ГС, а также изменением направления движения ПА по отношению к направлению движения СН (рис. 4.34). Также увеличиваются максимумы мощности движителя по сравнению с вариантом 2.

На примере варианта 3 выполнена оценка влияния количества элементов ГС на погрешность моделирования движения МПС (рис. 4.35). Для этого увеличили количество элементов ГС от 20 до 30 и сравнили результаты моделирования. Как следует из сравнения полученных результатов, форма ГС практически не изменяется.

На рис. 4.36 показано отличие сил натяжения ГС и мощности движителя.

Отличие сил натяжения ГС и мощности движителя также не превышает 3%.

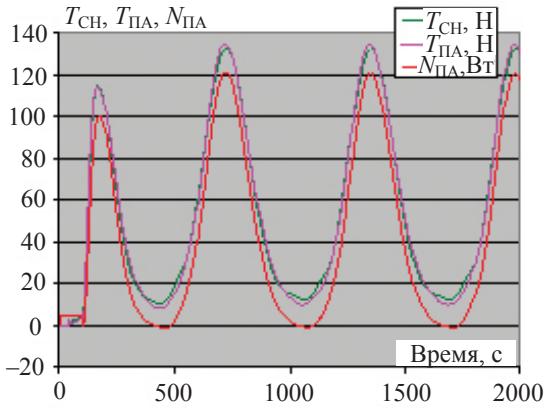


Рис. 4.34. Изменение силы натяжения ГС, действующей на СН и ПА

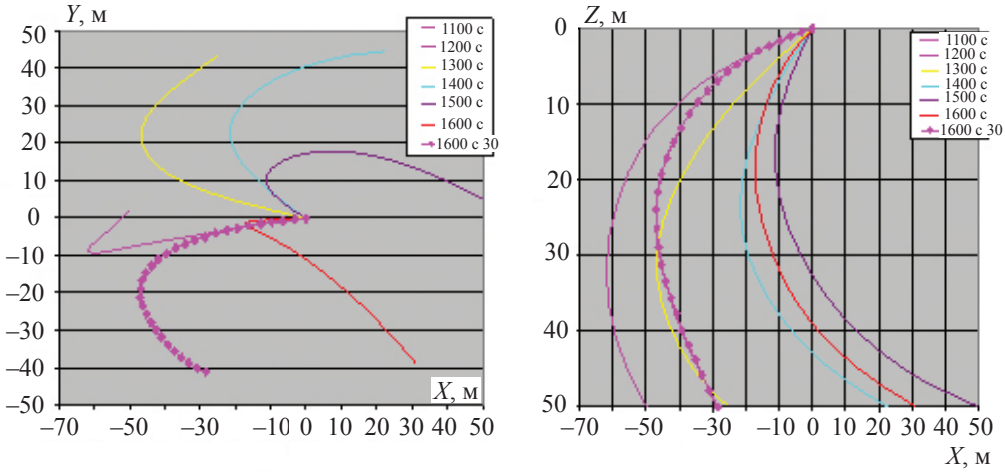


Рис. 4.35. Оценка влияния количества элементов ГС на погрешность моделирования движения МПС

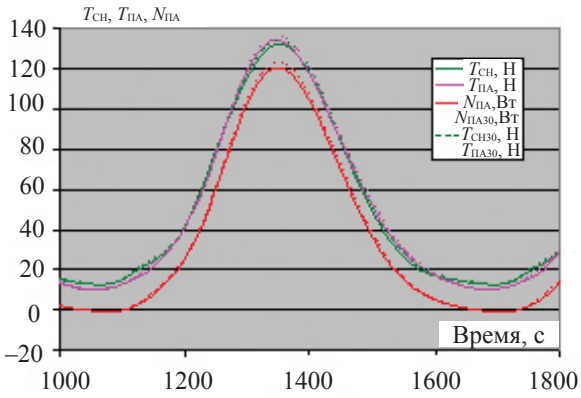


Рис. 4.36. Отличие сил натяжения ГС и мощности движителя

Вариант 4. Отличается от варианта 3 тем, что СН движется в направлении оси X со скоростью 0,25 м/с (рис. 4.37). Уменьшение скорости циркуляции ПА существенно уменьшает необходимую мощность движителя ПА и силы натяжения ГС.

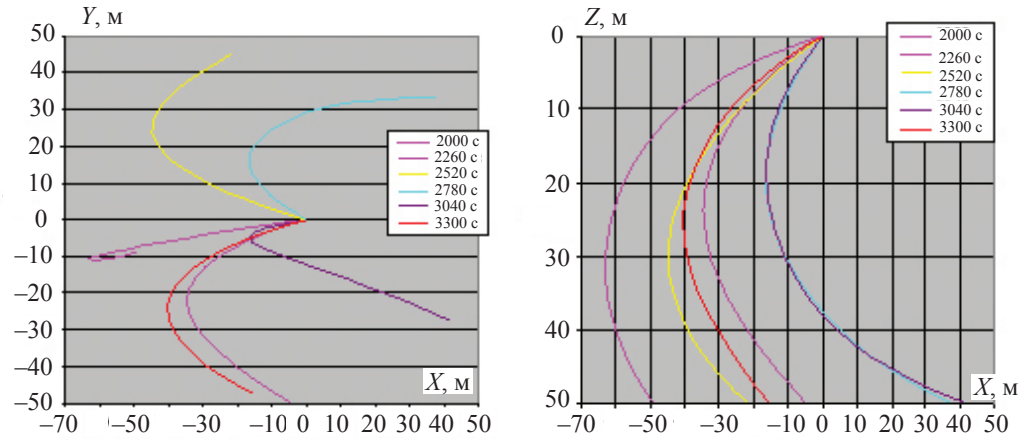


Рис. 4.37. Результаты моделирования движения СН в направлении оси X со скоростью 0,25 м/с

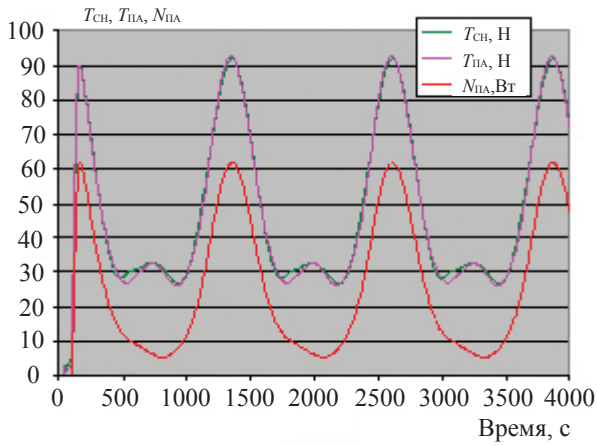


Рис. 4.38. Отличие сил натяжения ГС и мощности движителя

Вариант 5. Отличается от варианта 3 тем, что СН движется в направлении оси X со скоростью 1 м/с. Результаты моделирования показаны на рисунках 4.39 и 4.40.

Увеличение скорости циркуляции ПА существенно увеличивает необходимую мощность движителя ПА и силы натяжения ГС.

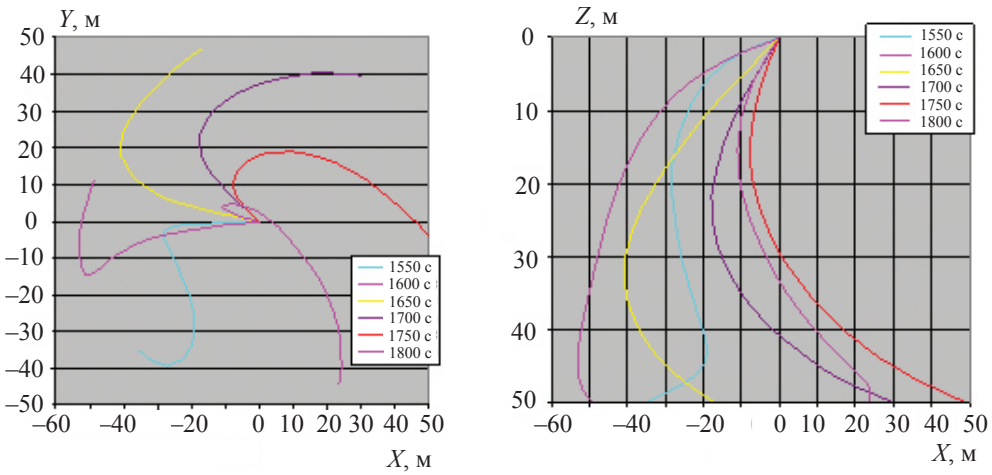


Рис. 4.39. Результаты моделирования движения СН в направлении оси X со скоростью 1 м/с

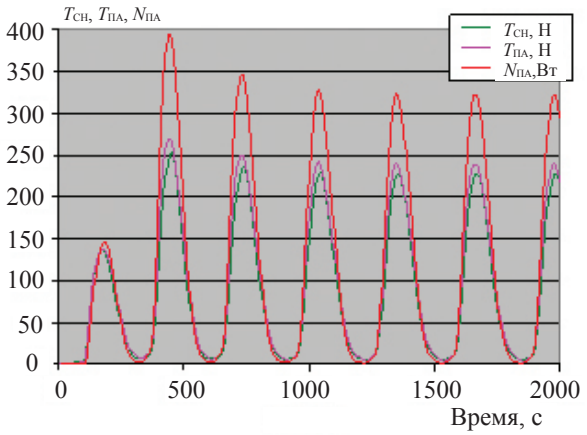


Рис. 4.40. Отличие сил натяжения ГС и мощности движителя

Вариант 6. СН движется по окружности радиусом 100 м со скоростью 1 м/с, а несамоходный ПА движется за ним на ГС длиной 100 м (рис. 4.41). Центр циркуляции СН находится в точке с координатами: X = 0; Y = –100 м; Z = 0.

Положение ГС в пространстве изменяется, но её форма изменяется мало (рис. 4.42).

Процесс движения достаточно быстро выходит на установившийся режим с небольшими колебаниями сил натяжения ГС, действующих на СН и ПА (рис. 4.43). ПА движется за СН по окружности радиусом ≈ 75 м на глубине ≈ 55 м.

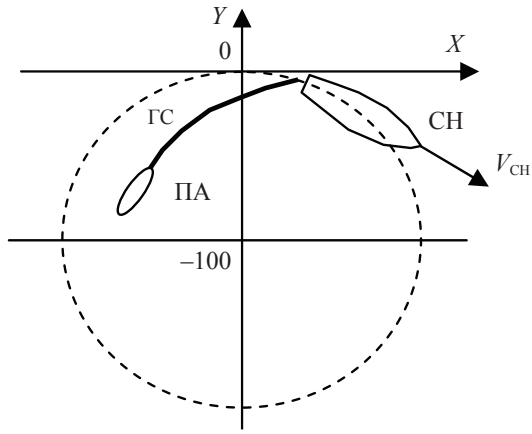


Рис. 4.41. Схема движения ПА вокруг СН по окружности радиусом 100 м со скоростью 1 м/с

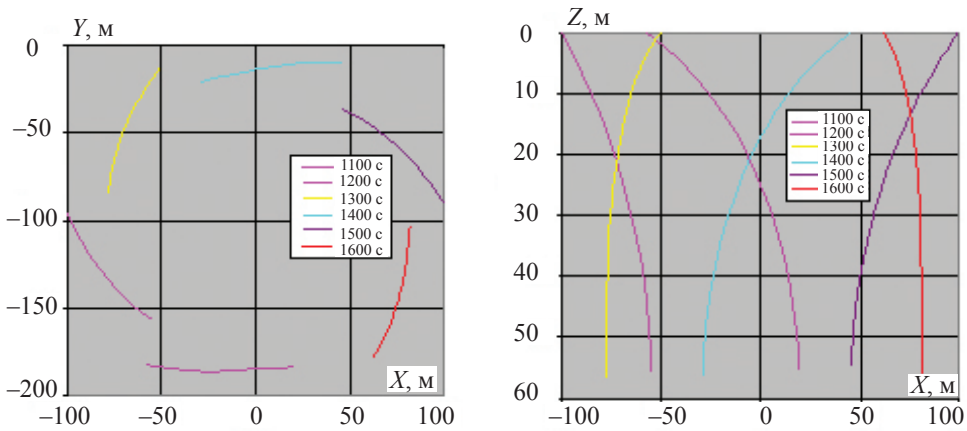


Рис. 4.42. Результаты моделирования движения СН по окружности радиусом 100 м со скоростью 1 м/с

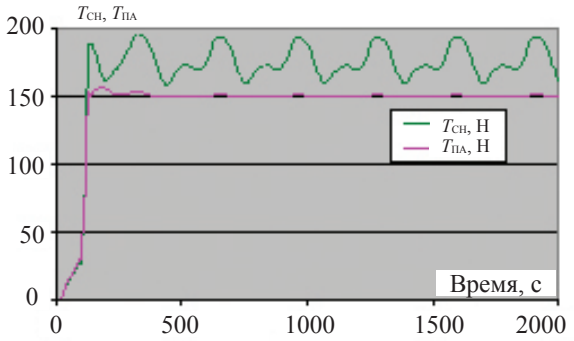


Рис. 4.43. Отличие сил натяжения ГС и мощности движителя

Вариант 7. СН движется по окружности радиусом 100 м со скоростью 1 м/с, а несамоходный ПА движется за ним на ГС длиной 100 м (рис. 4.44), но на ПА действует постоянная отклоняющая сила 100 Н, направленная вдоль оси Y. Центр циркуляции СН находится в точке с координатами: X = 0; Y = –100 м; Z = 0.

В процессе движения МПС отклоняющая сила искажает форму ГС и смещает центр циркуляции ПА в направлении оси Y приблизительно на 25 м (рис. 4.45), т.е. центры циркуляции СН и ПА не совпадают. В процессе циркуляции ПА глубина его погружения существенно изменяется (от 45 до 70 м).

На установившемся режиме движения привязной системы значительно увеличиваются силы натяжения ГС и их амплитуда колебаний (рис. 4.46).

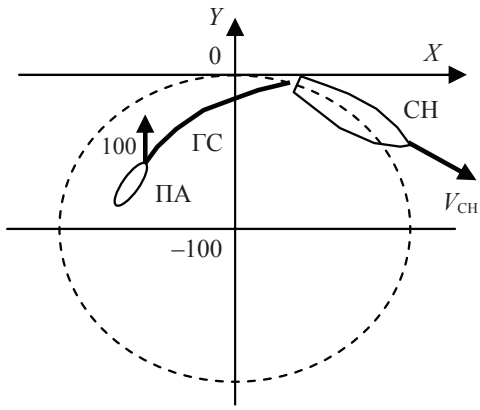


Рис. 4.44. Схема движения ПА вокруг СН по окружности радиусом 100 м со скоростью 1 м/с, а несамоходный ПА движется за ним на ГС длиной 100 м

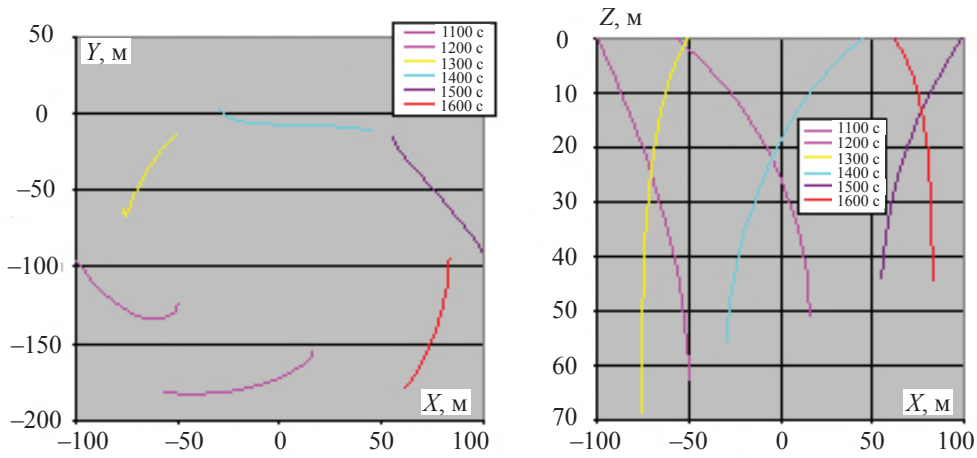


Рис. 4.45. Результаты моделирования движения СН по окружности радиусом 100 м со скоростью 1 м/с

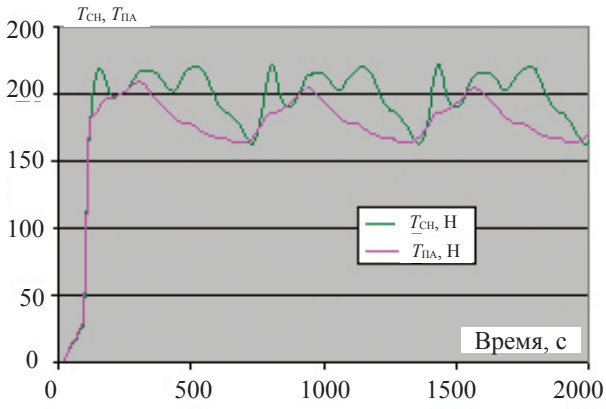


Рис. 4.46. Отличие сил натяжения ГС и мощности движителя

4.3.6. Пространственное движение морских привязных систем на примере буёв нейтральной плавучести

Существует ещё один класс МПС, имеющих в своём составе ГС [11, 91, 100, 145, 453], — своеобразные плавучие комплексы — буи, свободно плавающие (дрейфующие) или удерживаемые тросом (океанографические, нейтральной плавучести, специальные и т.п.).

И. Б. Иконников в предисловии к книге Г. О. Берто [11, с. 5] отмечает, что с помощью буев — поверхностных и заглубленных, свободно дрейфующих и стоящих на якоре, оснащенных современной электроникой и средствами дальней передачи информации, — можно с достаточной полнотой обследовать всю толщу океана в больших временных интервалах. В океане появилось множество крупных и довольно сложных буйковых станций, работающих в глубоководных районах и выполняющих разнообразные функции.

Так, д. ф-м. н., зав. Лабораторией морских течений Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН Владимир Жмур отмечает [454, с. 41], что одним из главных инструментов изучения океанских течений стала развивающаяся с конца 1990-х годов глобальная сеть роботизированных буев-поплавков ARGO с переменной плавучестью — главный современный инструмент изучения океанских течений. Устанавливаемые с кораблей или самолетов буи покрывают сетью почти весь Мировой океан. Буи равномерно распределены по всей акватории Мирового океана, кроме арктической зоны, с шагом примерно 300 км. Изначально запланированное количество в 3000 буев было достигнуто еще в 2007 году, и сейчас их число постоянно увеличивается. Характерная особенность роботизированного «поплавка» ARGO — его переменная плавучесть. Буй работает циклами по десять дней. Основное время (девять дней) он находится на глубине около 1000 м, затем кратковременно опускается на 2000 м, а затем всплывает, чтобы в течение дня передать на спутник все собранные за вахту данные. На разных глубинах и на поверхности буй замеряет плотность, электропроводность и даже оптические свойства воды.

В 1980-х годах задачу проектирования БНП рассматривали как однокритериальную задачу, когда все остальные требования могут быть выражены в форме тех или иных количественных ограничений [145, с. 122].

Буи нейтральной плавучести (БНП) — автономные автоматические несамоходные подводные аппараты, в которых в качестве полезного груза установлены различные комплексы исследовательской аппаратуры [145, с. 118]. Иногда их называют поплавками нейтральной плавучести (ПНП) — автономными носителями исследовательской аппаратуры, не имеющими автоматических средств управления плавучестью.

Появление ПНП, а затем и БНП было вызвано необходимостью:

– повышения точности гидроакустических и гравитационных измерений за счет отказа от электромеханической связи приборного комплекса с судном в виде кабель-троса, по которому неизбежно передаются возмущающие воздействия от судна;

– увеличения продолжительности измерений (прежде всего при изучении подводных течений, внутренних волн, океанских вихрей и других крупномасштабных явлений в океане) без использования сопровождающего судна.

В литературе [41, 53, 91, 100, 107, 108, 145, 150, 159, 160, 330, 333] накоплен большой объем теоретических и экспериментальных данных по гидродинамическому сопротивлению цилиндрических тел, который может быть использован при проектировании БНП. Для проектирования конкретных БНП, как отмечают И.Б. Иконников, В.М. Гаврилов и Г.В. Пузырев, необходимо правильно интерпретировать имеющиеся сведения [145, с. 124–125]. Анализ литературы [144, с. 128] показал, что методология статических расчетов ПНП имеет много общего со статикой неуправляемых ПА и ПЛ.

На рис. 4.47 приведен пример буйковой станции с натянутым буйрепом (принадлежит Вудс-Хоулскому океанографическому институту) [11, с. 114]. Используется для наблюдения, регистрации параметров окружающей среды (подводной и надводной) и передачи их в центр.

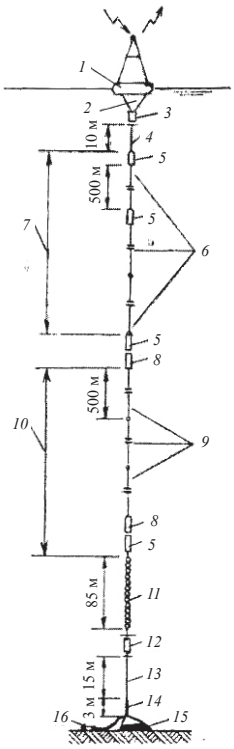


Рис. 4.47. Плавучий буй закреплён на неподвижном подводном основании (но может всплывать и погружаться), неподвижен (закреплён на неподвижном подводном основании) $V_{ПБ} = 0$:

1 — тороид с установленными на нем прожектором, измерителем скорости ветра и радиомаяком; *2* — жесткий бридель; *3* — тензометр с датчиком для телеметрической системы; *4* — цепь калибром 12,8 мм; *5* — измеритель скорости течений; *6* — металлический трос, рассчитанный на нагрузку 45300 Н (нескручивающийся) с гальванизированной и пластмассовой оболочками; *7* — участок троса длиной 1500–2000 м (в зависимости от места установки буя), защищенный от укусов рыб; *8* — регистратор натяжения; *9* — нейлоновый трос, выдерживающий нагрузку 45 300 Н (свободно скручивающийся); *10* — часть буйрепа, длина которой обеспечивает необходимое натяжение в зависимости от глубины на месте установки буя; *11* — элементы плавучести (пустотелые стеклянные сферы диаметром 40 см, закрепленные на нейлоновом тросе диаметром 19 мм); *12* — акустический размыкатель и приемоответчик: *13* — нейлоновый трос диаметром 19 мм; *14* — цепь калибром 12,8 мм; *15* — якорь Стимсона массой 1820 кг; *16* — якорь Данфорта массой 29,5 кг

При эксплуатации БНП необходимо учитывать гидродинамическое сопротивление БНП, обжатие корпуса БНП при погружении, температурное расширение корпуса БНП, внешние воздействия гидрологического происхождения, динамику неуправляемого движения БНП по глубине [145].

При освоении шельфа часто возникает необходимость в передаче значительной энергии по подводным кабелям. Компания «Симплекс Вайе энд Кэйбл» (Великобритания) разработала систему передачи электроэнергии под напряжением 35 кВ [192, с. 238]. Система состоит из нефтеперерабатывающего судна, оснащенного генератором; буя, связанного с дном посредством шарнирной стойки; промежуточного подводного буя, поддерживающего кабель, и эксплуатационной платформы. Судно постоянно связано с буем, установленным на шарнирной стойке и выполняющим функции рейдового причала.

На рис. 4.48 приведена одноякорная буйковая станция Вудс-Хоулского океанографического института с буем у дна [11, с. 121].

На рис. 4.49 приведена французская буйковая станция с подводным вспомогательным буем.

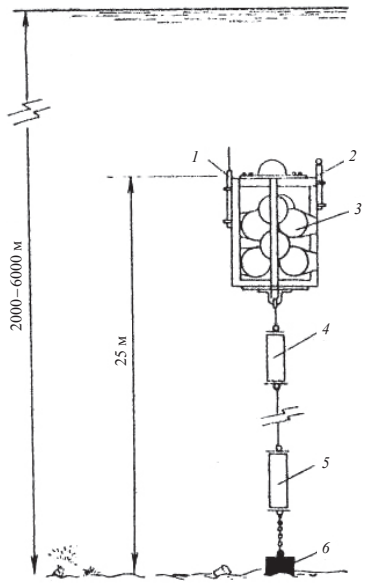


Рис. 4.48. Одноякорная буйковая станция Вудс-Хоулского океанографического института с буем у дна [3, с. 116]:

1 — радиомаяк; *2* — мигающий огонь; *3* — сферические стеклянные плавучести; *4* — измеритель скорости течения; *5* — акустический размыкатель; *6* — якорь

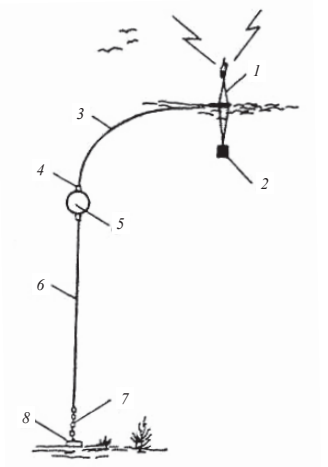


Рис. 4.49. Буйковая станция с подводным вспомогательным буем [11, с. 116]:

1 — вертикальный цилиндрический буй с прожектором, радиопередатчиком и метеорологическими датчиками; *2* — электронный блок; *3* — плавучий полужесткий; *4* — универсальное соединение; *5* — вспомогательный подводный буй; *6* — металлический трос; *7* — цепь; *8* — якорь

В книге Г.О. Берто [11, с. 7] рассмотрены совокупность теоретических и практических сведений, необходимых для проектирования и выбора основных элементов буйковых комплексов. К таким элементам относятся собственно буи (т.н. тела с ограниченным перемещением): поверхностные и заглубленные, буйрепы (удерживающие тросы), якоря и вспомогательные устройства и оборудование. Эти элементы объединены в буйковые системы. Здесь также рассмотрены статика и динамика погруженных якорных тросов. В статике рассматриваются постоянные нагрузки и результирующая конфигурация буйрепов. Сначала исследуются простейшие модели с так называемыми «замкнутыми решениями» («цепные линии»), затем вводятся кабельные функции, детально рассматриваются методы программированного расчета плоского и пространственного вариантов. В динамике буйрепов исследуются линейные модели. В первой модели трос рассматривается как упругая непрерывная среда. В этом случае натяжения и величины смещения определяются из решения волнового уравнения с соответствующими граничными условиями. Во второй модели трос представляется в виде конечного числа дискретных масс, соединенных между собой пружинными элементами. В заключение этой части даются методы решений систем с несколькими степеня-

ми свободы. Рассмотрены также классификация буев, методы их проектирования, особенности конструкции, выбор материалов плавучести и т.п.

В [330, с. 72–76] предложена математическая модель притопленной автономной буйковой станции (АБС), с помощью которой на основе экспериментальных данных об относительной скорости течения на ряде горизонтов в дискретные моменты времени предполагается восстановить геометрию АБС в эти моменты времени и оценить искажения, вносимые собственным движением АБС в показания скорости течения.

На рис. 4.50 приведен пример — притопленная буйковая система с распределенными по всему буйрепу элементами плавучести (пустотелыми стеклянными сферами) [11, с. 208]. Как видим, их конструкция может быть довольно сложной и громоздкой.

Как отмечает Г.О. Берто [11, с. 9], анализ сил, создаваемых частицами жидкости и действующих на плавающие тела с ограниченным перемещением, и их моментов является важнейшим условием правильного проектирования плавучих конструкций и выбора способов их удержания в определённой точке океана. Предполагается, что силы, обусловленные течениями и ветрами, неизменны, а силы, вызываемые волнением, со временем меняются. Волнение в океане оказывает сильное воздействие на поведение якорных тросов, удерживающих буйковые



Рис. 4.50. Типичная притопленная буйковая система с распределенными по всему буйрепу элементами плавучести (пустотелыми стеклянными сферами) [11, с. 208]:

1 — притопленкый буй с радиомаяком и проблесковым огнем; *2* — цепь калибром 12,7 мм; *3* — элементы плавучести (восемь стеклянных сфер диаметром по 406 мм, заключенных в пластмассовые контейнеры, прикрепленные к цепной смычке на болтах); *4* — измеритель течений; *5* — дакроновый канат диаметром 9,5 мм; *6* — измеритель наклона буйрепа; *7* — восемь стеклянных сфер диаметром по 406 мм; *8* — семь стеклянных сфер; *9* — нейлоновый канат диаметром 14,3 мм; *10* — шесть стеклянных сфер; *11* — тензометр; *12* — акустический размыкатель; *13* — нейлоновый канат диаметром 18,9 мм; *14* — якорь Стимсона массой 1132,5 кг

станции [11, с. 80]. Исследование реакций тросов на эти воздействия позволяет определить значения и характер распределения динамических нагрузок, а также выяснить условия возникновения резонанса.

При выборе типа и размеров элементов динамические нагрузки должны рассматриваться совместно со статическими [145]. Резонансные явления и вызванные ими значительные колебания троса могут создавать огромные пиковые нагрузки. В результате возникает угроза серьезных повреждений. Для исследования динамики буйрепов применяют два принципиально различных подхода: буйреп рассматривается как непрерывная упругая нить и как последовательность дискретных, свободно колеблющихся на пружинах масс.

В общем случае задачи динамики неуправляемого движения БНП могут быть отнесены к динамике сжимаемого тела, движущегося в сжимаемой стратифицированной невозмущенной жидкости [145, с. 16]. Поскольку зона глубин стабилизации БНП в пассивном режиме не превышает нескольких десятков метров, то обычно рассматривают линейную стратификацию полей плотности и (или) температуры в направлении вектора гравитации. Динамика неуправляемого движения БНП исследует движение буя под воздействием различных возмущающих процессов аппаратуры [145, с. 126]. Достоверность математического моделирования процессов движения будет тем выше, чем точнее исходные уравнения движения БНП. Динамика неуправляемого движения БНП, т. е. динамика ПА, движущегося с малыми скоростями, рассмотрена в работах [29, 100, 107, 109, 151, 320]. И. Б. Иконников и др. отмечали, что некоторые из них могут быть использованы при разработке уточненных уравнений движения БНП. Задача движения сферы решена в нелинейной постановке.

В известных работах отсутствует достаточно полное обоснование структуры математической модели движения ПА, учитывающей особенности гидродинамического сопротивления при малых скоростях движения, упругие объемные деформации прочного корпуса в случае изменения глубины погружения и температуры окружающей воды, а также возможные нелинейные эффекты в жидкости, возникающие в процессе взаимодействия ПА с окружающей водной средой [145, с. 127].

Целью данного исследования является проверка работоспособности и универсальности созданных математической модели динамики МПС с ГС [388, 432], алгоритма и компьютерной программы моделирования динамики МПС с ГС на примере БНП, позволяющих выполнять расчёты динамики БНП. В полученной модели вместо СН используем БНП, а в качестве ПА — якорь Я.

Рассмотрим примеры использования модели динамики МПС с ГС [399, 438]:

– малый буй без поплавка, течение под 45°, волнение, скала 10 м;

– буй малый и груз, течение под 45°, волнение, скала 10 м;

– буй малый и груз, течение под 45°, волнение, скала 10 м, малый ход СН.

Случай 1. Малый буй без поплавка, течение под 45°, волнение, скала 10 м. На рис. 4.51 приведен вид рабочего окна программы моделирования динамики БНП после ввода исходных данных.

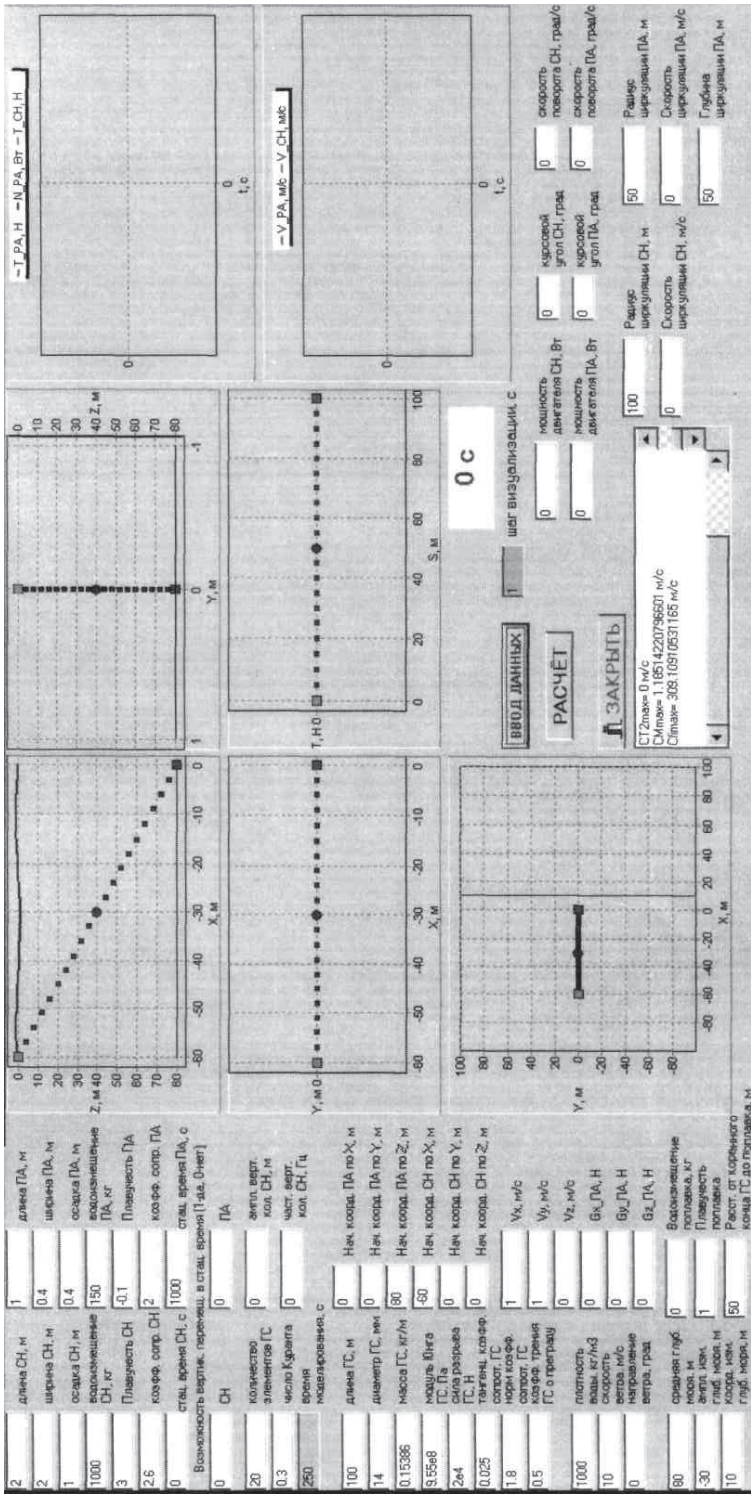


Рис. 4.51. Вид рабочего окна программы моделирования динамики плавучего буя после ввода исходных данных для случая 1

Рабочее окно программы содержит окна для задания величин 58 параметров МПС и 4 параметров алгоритма. Справа от этих окон кратко записано название параметров и их размерности. Количество элементов ГС определяет погрешность моделирования и затраты времени на выполнение расчётов. Время моделирования динамики условно принято 250 с. Шаг визуализации результатов моделирования определяет частоту обновления диаграмм в рабочем окне программы и записи результатов в файлы на жёстком диске компьютера.

Две группы, по восемь параметров в каждой, определяют характеристики БНП и якоря Я (табл. 4.12).

Таблица 4.12. Параметры плавучего буя и якоря

№	Характеристики	БНП	Я
1	длина	2 м	1 м
2	ширина	2 м	0,4 м
3	осадка	1 м	0,4 м
4	водоизмещение	1000 кг	150 кг
5	плавучесть	3	– 0,1
6	коэффициент сопротивления	2,6	2
7	стационарное время	0 с	1000 с

Стационарное время означает время от начала моделирования динамики МПС, в течение которого БНП или Я остаются неподвижными в плоскости моря. Возможность вертикального перемещения БНП и Я в стационарное время 0 (отсутствует). Число Куранта 0,3.

Длина ГС — 100 м. Количество элементов ГС принято 20, длина одного элемента не составляет 5 метров. Параметры ГС: начальная длина ГС 100 м; начальный диаметр ГС 14 мм; плотность единицы длины ГС 0,15386 кг/м; модуль Юнга материала ГС $9{,}55 \cdot 10^8$ Па; допустимая сила растяжения ГС $2 \cdot 10^4$ Н; тангенциальный коэффициент гидродинамического сопротивления ГС 0,025; нормальный коэффициент гидродинамического сопротивления ГС 1,8; коэффициент трения ГС о преграду 0,5.

Начальные координаты ГС определяются тремя координатами БНП и Я: начальная координата БНП по X –60 м; начальная координата БНП по Y 0 м; начальная координата БНП по Z 0 м; начальная координата Я по X 0 м; начальная координата Я по Y 0 м; начальная координата Я по Z 80 м. В начальный момент времени ГС имеет форму прямой нерастянутой линии (сила натяжения равна нулю), соединяющей точки с координатами БНП и Я. Если начальная длина ГС больше, чем расстояние между БНП и Я, тогда алгоритм программы автоматически изменяет координаты положения Я в плоскости XOY, не изменяя при этом заданную координату его положения по Z, а затем, до начала моделирования динамики МПС, перемещает Я в первоначально заданную точку. При этом, если заданная координата Я по оси Z больше, чем минимальная глубина моря, тогда координата Я по оси Z задаётся равной минимальной глубине моря.

Вода моря считается несжимаемой и характеризуется плотностью 1000 кг/м^3. Характеристики установившегося волнения на поверхности моря определяются двумя параметрами: скорость ветра 10 м/с; угол направления ветра 0 град. Однородное по объёму акватории морское течение характеризуется тремя проекциями его скорости на оси координат: V_x 1 м/с; V_y 1 м/с; V_z 0 м/с.

Рельеф дна акватории характеризуется тремя параметрами: средняя глубина моря 80 м; амплитуда изменения глубины моря –30 м; координата (по оси X) изменения глубины моря 10 м. Глубина моря изменяется ступенчато, на величину заданной амплитуды, постоянной вдоль линии, параллельной оси Y, положение которой в направлении оси X определяется координатой изменения глубины моря. Если глубина моря уменьшается, то амплитуда отрицательная, иначе — она положительная. В заданные моменты времени (с заданным шагом визуализации) происходит запись обобщённых координат узлов ГС и ПБ, а также сил растяжения ГС в узлах её элементов в файловой системе компьютера. Эти файлы становятся доступны для анализа данных после завершения работы программы. Записанные параметры приведены в табл. 4.12.

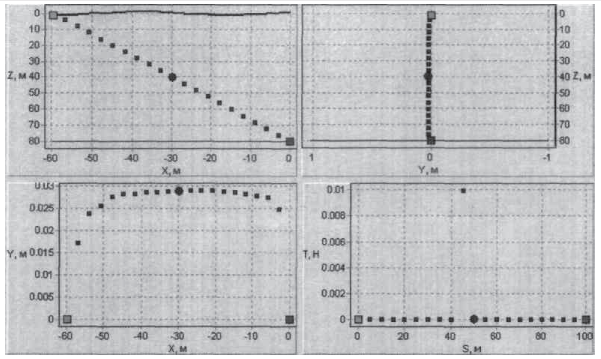
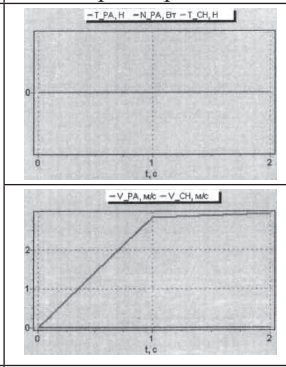
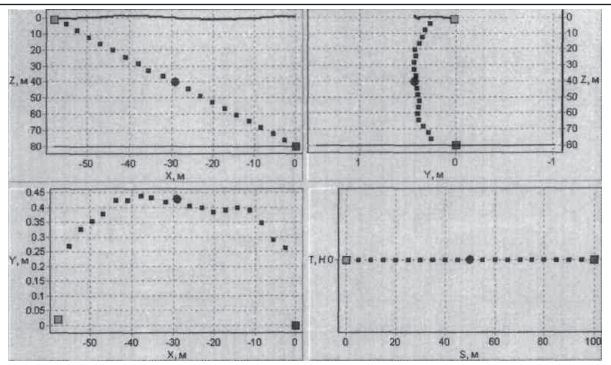
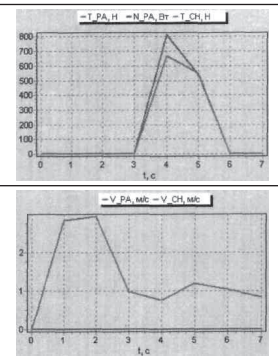
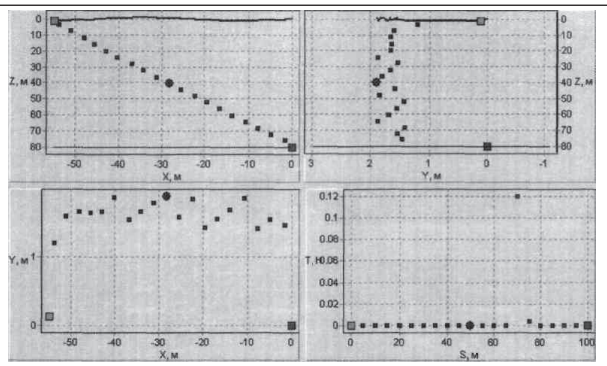
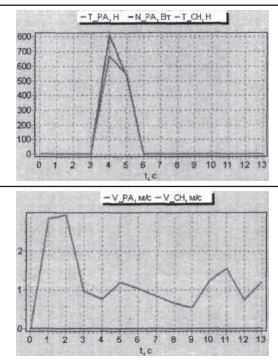
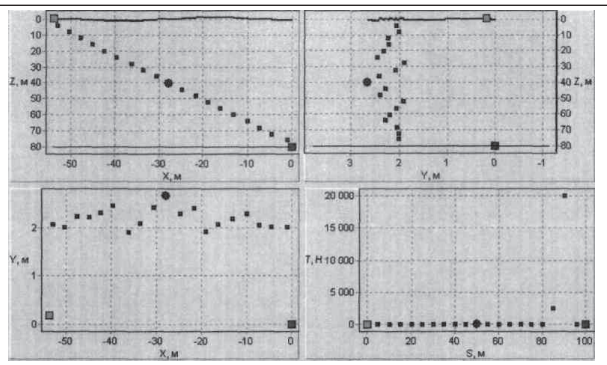
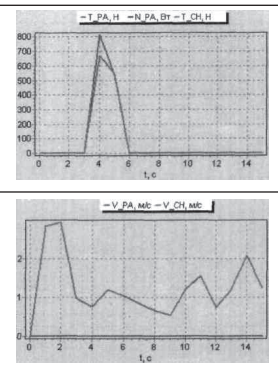
Результаты моделирования представляются графически на семи диаграммах в заданные моменты времени, которые показываются в окне рядом с диаграммами. Эти моменты определяются интервалом времени, через который происходит смена изображений на диаграммах, и задаются параметром «шаг визуализации, с». В данном случае три диаграммы показывают пространственное расположение БНП, ГС и Я в проекциях на плоскости X0Z, Y0Z и X0Y прямоугольной декартовой системы координат. Четвёртая диаграмма показывает распределение силы растяжения ГС вдоль её длины (координата S) (показаны во втором столбце табл. 4.13).

На первых трёх диаграммах диапазон координат непрерывно меняется, адаптируясь к расположению МПС в текущий момент времени, поэтому для большей наглядности на пятой диаграмме координаты X и Y изменяются только в пределах ±100 м. На шестой диаграмме располагаются данные об изменении во времени сил натяжения ГС, действующих на плавучий буй (и якорь). На седьмой диаграмме демонстрируется изменение скорости плавучего буя (естественно, скорость якоря равна 0) в процессе его движения. В процессе моделирования динамики плавучего буя сила растяжения ГС превысила допустимое значение на 15,77 с (произошёл разрыв ГС), программа завершила работу и поместила на рабочем окне сообщение «Разрыв ГС!!!».

Случай 2. Рассмотрим случай: буй малый и груз, течение под 45°, волнение, скала 10 м. Подобная схема приведена на рис. 4.52 [53, с. 124].

Плавучести поддерживают в натянутом состоянии участок якорного каната у якоря, сила тяжести этого участка на буй-станцию не передаётся. Канат свободно провисает, канаты стальные. В качестве анкерных опор используются судовые или гравитационные якоря. Вертикальную нагрузку от силы тяжести этого участка якорного каната воспринимает буй-станция. Плавучести поддерживают в натянутом состоянии участок якорного каната у якоря, сила тяжести этого участка на буй-станцию не передаётся.

Таблица 4.12. Параметры модели в зависимости от времени

Время	Параметры в системе координат	Параметры ГС
2 с		
7 с		
13 с		
15,77 с		

На рис. 4.53 приведен фрагмент рабочего окна программы моделирования динамики динамики плавучего буя после ввода исходных данных для данного случая.

В табл. 4.13 для данного случая приведены пространственное расположение ПлБ, ГС и Я, параметры ГС для некоторых этапов.

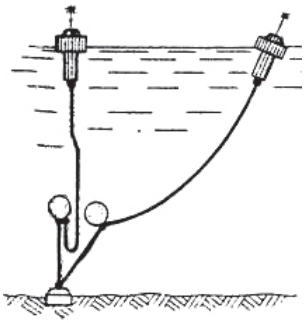


Рис. 4.52. Якорные системы буевстанций с прикреплёнными к связям плавучестями для больших глубин

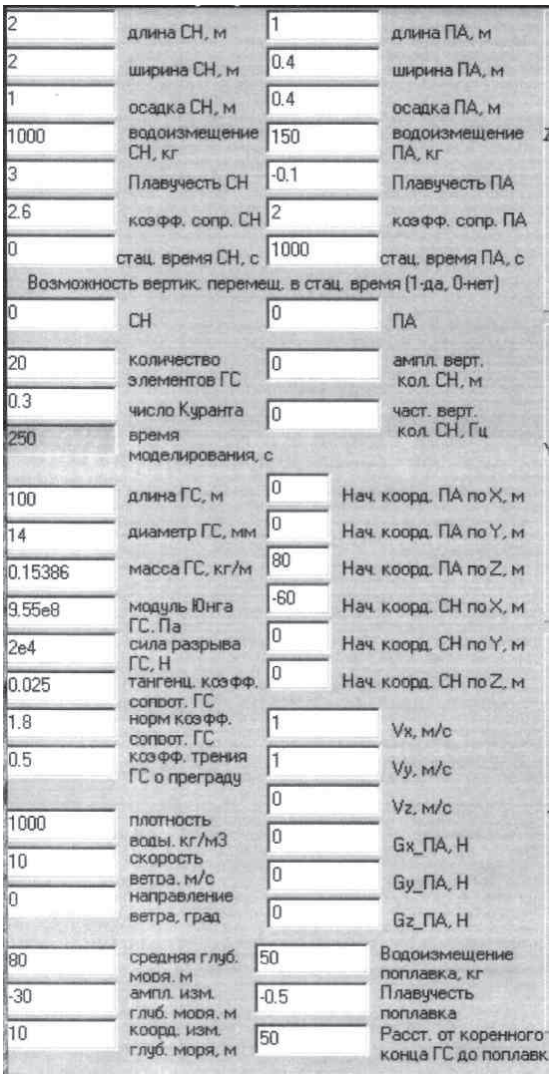
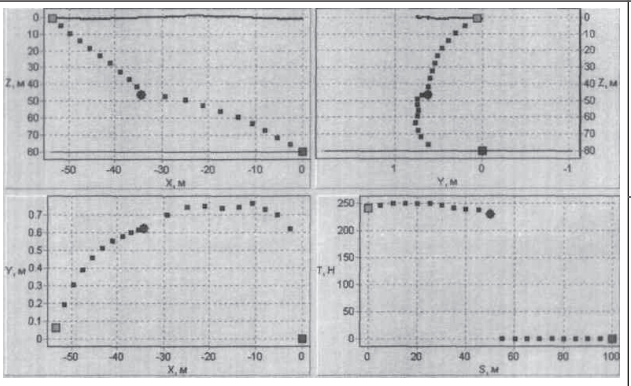
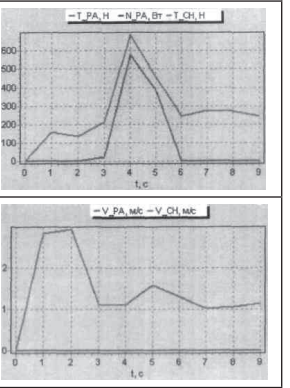
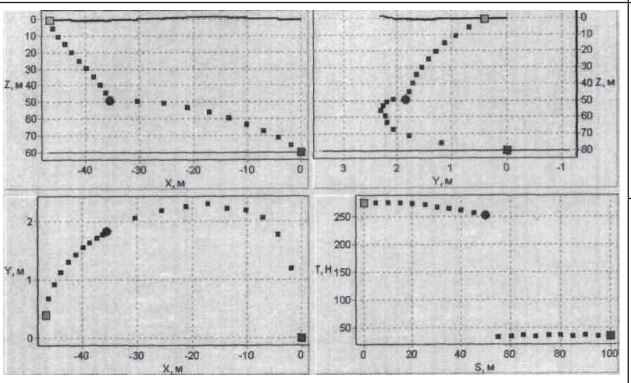
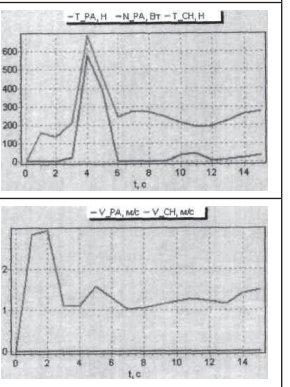
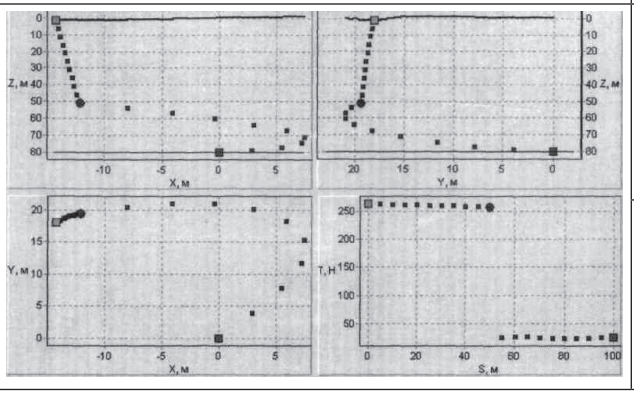
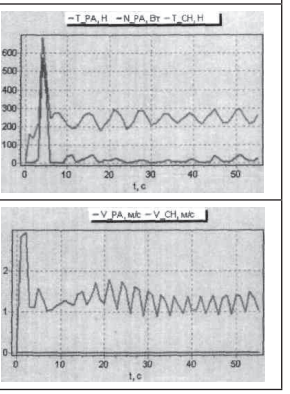
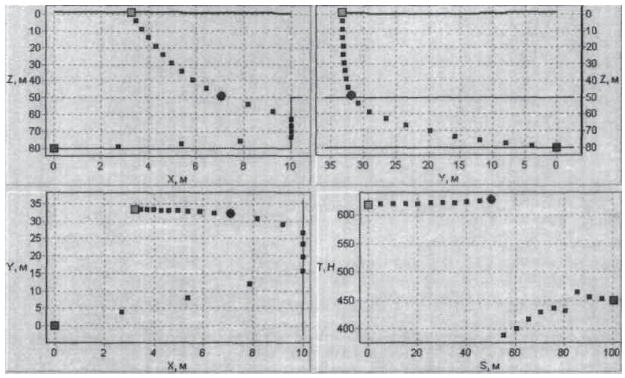
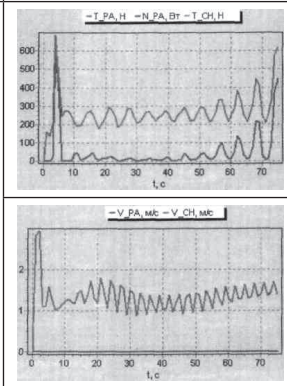
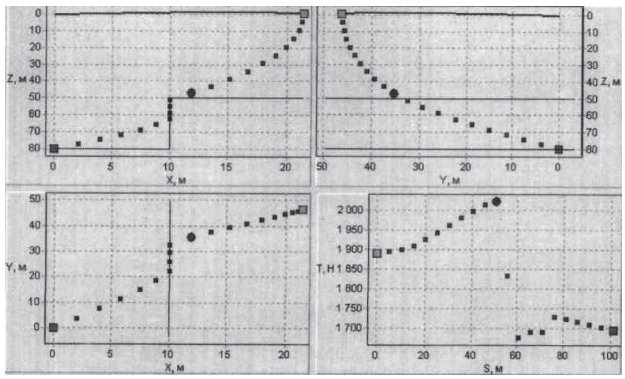
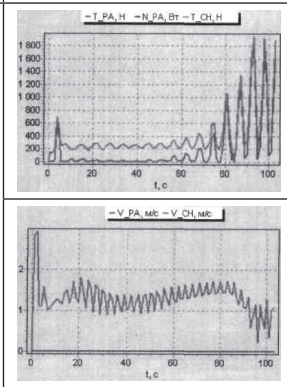
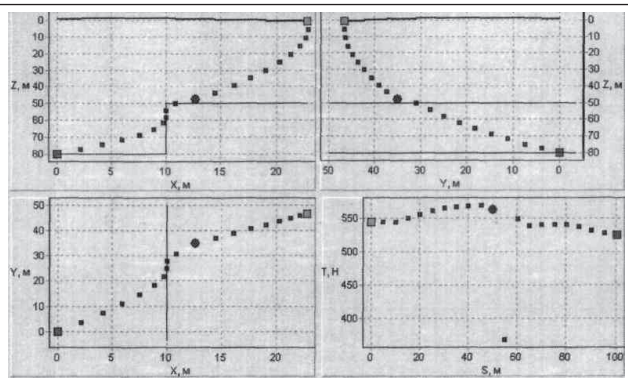
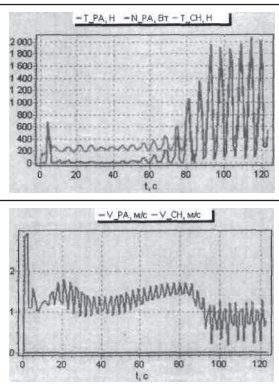


Рис. 4.53. Фрагмент рабочего окна программы моделирования динамики плавучего буя после ввода исходных данных для случая 2

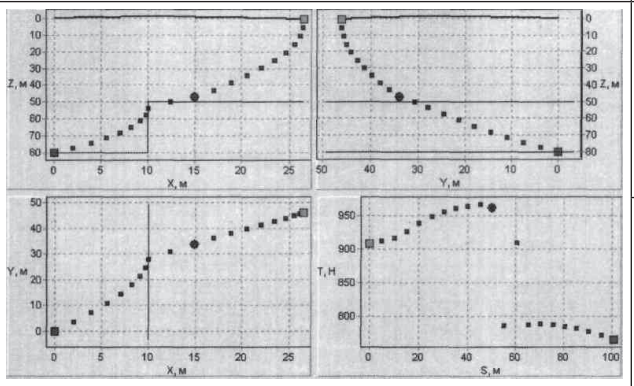
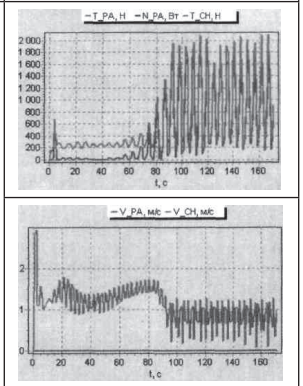
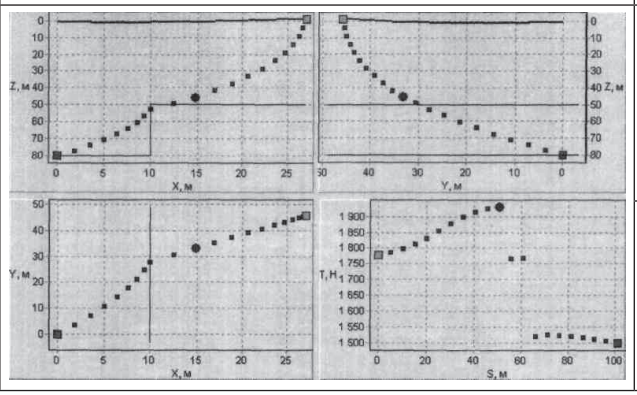
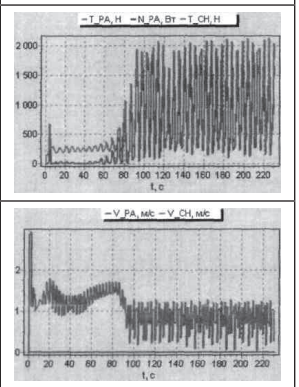
Таблица 4.13. Параметры модели в зависимости от времени

Время	Параметры в системе координат	Параметры ГС: T и V
1	*2*	*3*
9 с		
15 с		
55 с		

Продолжение таблицы 4.13

1	*2*	*3*
75 с		
103 с		
123 с		

Окончание таблицы 4.13

1	*2*	*3*
171 с		
231 с		

Время моделирования динамики условно принято 250 с. В первом столбце табл. 4.13 приводится время моделирования динамики (выбиралось произвольно). Последней точкой было выбрано время 231 с., т.к. в дальнейшем для точки 250 с характеристики практически не отличаются. Диаграммы во 2 столбце табл. 4.13 позволяют наблюдать за изменением параметров системы в реальном масштабе времени.

Как видим, груз оттягивает малый буй и не даёт ему возможности свободно перемещаться. На 103 с ГС касается подводной преграды (скалы), прижимает ГС к скале, в результате чего ГС скользит по ней. Разрушения ГС не происходит, как в предыдущем случае.

Случай 3. Рассмотрим случай: малый буй и груз, течение под 45°, волнение, скала 10 м, малый ход СН. В качестве примера можно привести схему (рис. 4.54) [11].

На рис. 4.55 приведен фрагмент рабочего окна программы моделирования динамики динамики плавучего буя после ввода исходных данных для данного случая.

В табл. 4.14 для данного случая приведены пространственное расположение СН, ПлБ, ГС и Я, параметры ГС для некоторых этапов. Время моделирования динамики условно принято 250 с.

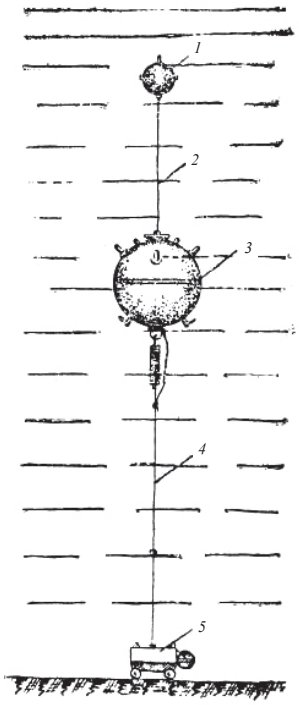
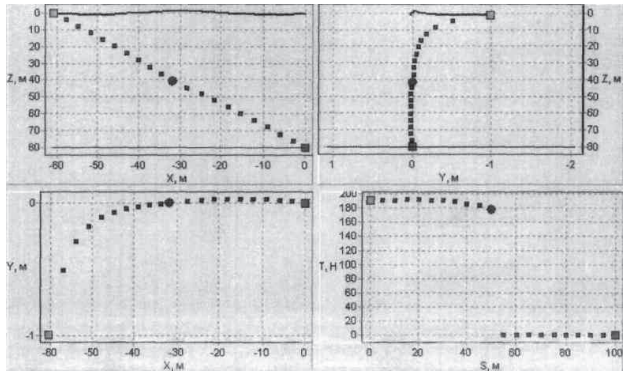
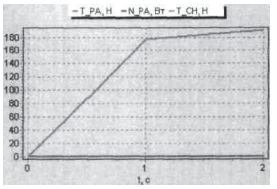
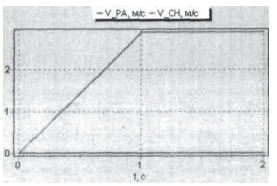
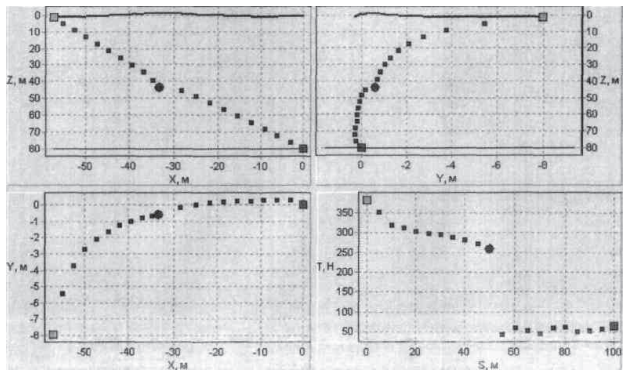
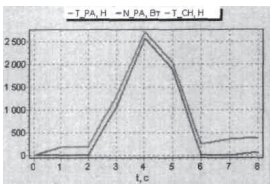
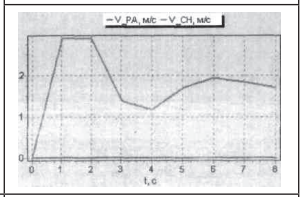
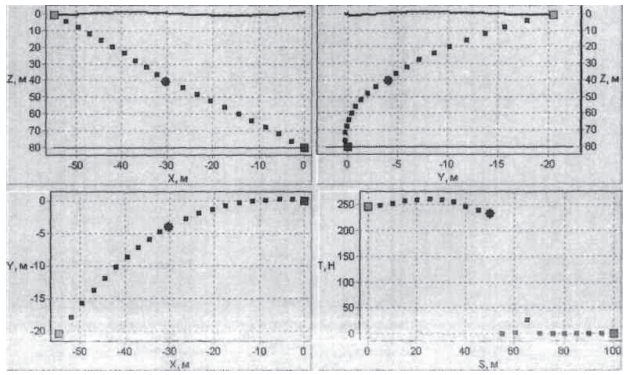
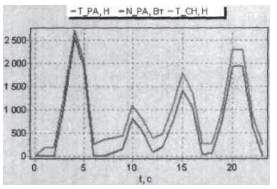
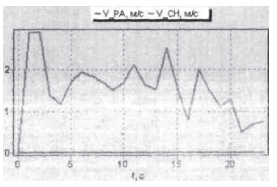


Рис. 4.54. Антенная мина.
1 — буек; *2* — верхняя антенна; *3* — мина; *4* — нижняя антенна; *5* — якорь

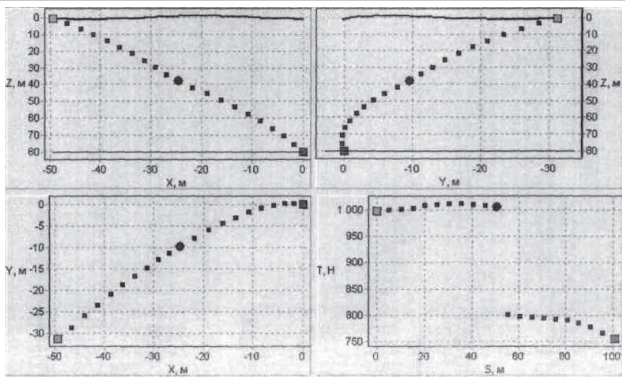
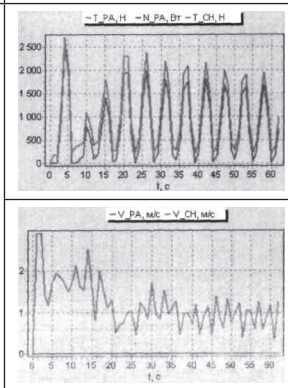
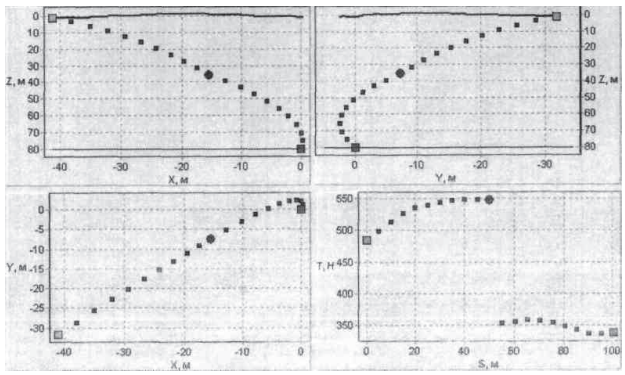
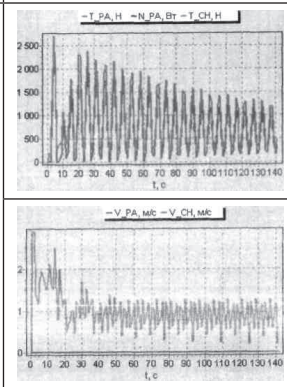
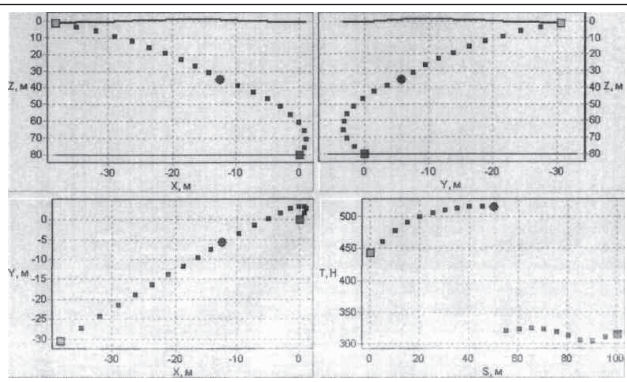
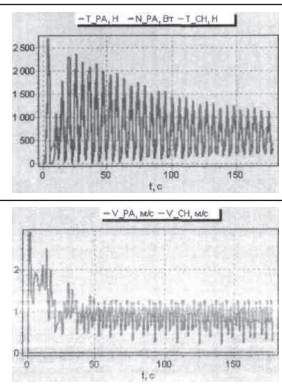
2	длина СН, м	1	длина ПА, м
2	ширина СН, м	0.4	ширина ПА, м
1	осадка СН, м	0.4	осадка ПА, м
1000	водоизмещение СН, кг	150	водоизмещение ПА, кг
3	Плавучесть СН	-0.1	Плавучесть ПА
2.6	коэфф. сопр. СН	2	коэфф. сопр. ПА
0	стац. время СН, с	1000	стац. время ПА, с
Возможность вертик. перемещ. в стац. время (1-да, 0-нет)			
0	СН	0	ПА
20	количество элементов ГС	0	ампл. верт. кол. СН, м
0.3	число Куранта	0	част. верт. кол. СН, Гц
250	время моделирования, с		
100	длина ГС, м	0	Нач. коорд. ПА по X, м
14	диаметр ГС, мм	0	Нач. коорд. ПА по Y, м
0.15386	масса ГС, кг/м	80	Нач. коорд. ПА по Z, м
9.55e8	модуль Юнга ГС, Па	-60	Нач. коорд. СН по X, м
2e4	сила разрыва ГС, Н	0	Нач. коорд. СН по Y, м
0.025	тангенц. коэфф. сопрот. ГС	0	Нач. коорд. СН по Z, м
1.8	норм коэфф. сопрот. ГС	1	Vx, м/с
0.5	коэфф. трения ГС о преграду	1	Vy, м/с
		0	Vz, м/с
1000	плотность воды, кг/м3	0	Gx_ПА, Н
10	скорость ветра, м/с	0	Gy_ПА, Н
0	направление ветра, град	0	Gz_ПА, Н
80	средняя глуб. моря, м	50	Водоизмещение поплавка, кг
-30	ампл. изм. глуб. моря, м	-0.5	Плавучесть поплавка
10	коорд. изм. глуб. моря, м	50	Расст. от коренного конца ГС до поплав

Рис. 4.55. Фрагмент рабочего окна программы моделирования динамики динамики плавучего буя после ввода исходных данных для случая 3

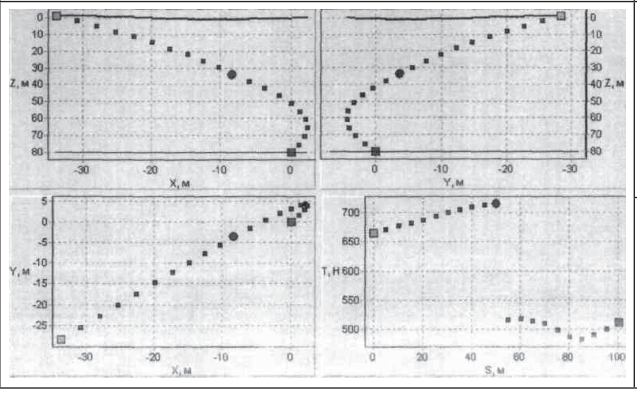
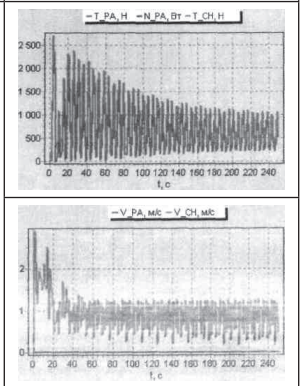
Таблица 4.14. Параметры модели в зависимости от времени

Время	Параметры в системе координат	Параметры СН и ГС
1	*2*	*3*
3 с		 
8 с		 
23 с		 

Продолжение таблицы 4.14

1	*2*	*3*
62 с		
141 с		
178 с		

Окончание таблицы 4.14

1	*2*	*3*
250 с		

В первом столбце табл. 4.14 приводится время моделирования динамики (выбиралось произвольно), которое условно принято 250 с. Последней точкой служат показания параметров для времени 250 с. Диаграммы во 2 столбце табл. 4.14 позволяют наблюдать за изменением параметров системы в реальном масштабе времени. Скорость движения СН небольшая (мощность двигателя СН 1000 Вт), однако, наблюдая за изменениями параметров, можно заметить, что в условиях волнения и наличия на ГС груза мощности СН не хватает для удержания на курсе (см. параметры для 3 с и 250 с). ГС не касается подводной преграды (скалы), т.к. СН отводит ПБС систему от неё. В 3 столбце табл. 4.14 приведены параметры (сверху вниз): $T_{СН}$ — сила натяжениея ГС на ходовом конце ГС, Н; N — мощность двигателя СН, Вт; $V_{СН}$ — скорость СН, м/с. За счёт волнения и воздействия груза, находящегося в середине ГС, образуются пульсации в ГС, которые можно видеть на диаграммах. Однако разрушения ГС не происходит.

Как видим, созданная компьютерная программа описания динамики МПС с ГС позволяет применить её также и для описания процесса дивжения БНП на якоре. Разработанные математическая модель и алгоритм динамики ГС МПС, реализованные в виде компьютерной модели описания динамики ГС МПС, позволяют проектанту МПС, имеющих в своём составе ГС, более качественно и оперативно проектировать практически все классы МПС на различных режимах эксплуатации и маневрирования.

Выводы по Разделу 4

В четвёртом разделе, названном «Аварийные режимы функционирования гибких связей морских привязных систем на примере подводных буксируемых систем», рассмотрены аварийные режимы работы (функционирования) морских привязных систем, классификация аварийных режимов функционирования морских привязных систем.

Здесь же рассмотрены отдельные примеры аварийных режимов работы: аварийный зацеп гибкой связи за подводное препятствие, столкновение гибкой связи подводной буксируемой системы с подводным объектом посередине гибкой связи, столкновение гибкой связи подводной буксируемой системы с подводным объектом в произвольном месте гибкой связи, аварийный режим торможения судна-носителя подводной буксируемой системы, режим циркуляции судна-носителя с подводной буксируемой системой, столкновение судна-носителя с надводным объектом и подводным препятствием, посадка на мель.

Проведенное тестирование компьютерной программы модели динамики МПС с ГС для режима циркуляции показало работоспособность программы и позволяет использовать её в дальнейшем для проведения практических расчётов параметров МПС с ГС.

Данная компьютерная программа описания динамики МПС с ГС позволяет применить её для описания динамики практически всех классов МПС и позволяет проектанту МПС, имеющих в своём составе ГС, более качественно и оперативно проектировать практически все классы МПС на различных режимах эксплуатации и маневрирования.

Использование данной компьютерной программы описания динамики МПС с ГС позволяет также отказаться от физического моделирования изучаемых процессов, связанного с проведением натурных испытаний в открытом море, что даёт существенную экономию финансовых и материальных средств, человеческих ресурсов.

5

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОРСКИХ ПРИВЯЗНЫХ СИСТЕМ С ГИБКИМИ СВЯЗЯМИ

В данном разделе рассмотрены проблемы и теоретические основы проектирования элементов МПС с ГС, а также методы совершенствования их проектирования на основе применения математической и компьютерной программы описания динамики МПС с ГС на примере ПБС. В качестве примера палубных механизмов рассмотрены судовые специальные палубные лебёдки ПБС, приведены рекомендации для проектантов-разработчиков по использованию данных методов. В качестве примера рассмотрены устройства: грузовые и буксирные лебёдки, траловые лебёдки, специальные лебёдки для спуска и буксировки ПА и др. ПО, спуско-подъемные устройства (СПУ).

В данном разделе также предложены методы совершенствования их проектирования на основе применения математической и компьютерной программы модели динамики МПС с ГС на примере ПБС.

5.1. Теоретические основы проектирования машин

Научную основу конструирование машин получило только во второй половине XIX в. в связи с возрастающими потребностями промышленности, усложнением машин и развитием технической базы машиностроения, что, в свою очередь, потребовало совершенствования и изменения методов конструирования.

В конце XIX и начале XX вв. наряду с расширением и укреплением технической базы машиностроения стали создаваться специализированные конструкторские бюро, появился ряд работ по расчету и конструированию машин, что способствовало появлению разнообразных оригинальных конструкций машин, порой одного и того же назначения, так как в тот период конструкторы руководствовались лишь требованиями момента [458, с. 5].

По мере накопления опыта все острее стало ощущаться отсутствие общей методологии, которая соединила бы теорию и практику конструирования машин, с одной стороны, и общие тенденции развития машиностроения, общетехнические и социальные проблемы — с другой.

Внедрение в сферу конструирования машин различных теорий и концепций, заимствованных из других областей знании, как отмечает В. И. Борисов [458, с. 3], требует от конструкторов вполне определенной эрудиции и четкой ориентировки

в новых условиях, вызывает необходимость выработать некоторую общую систему взглядов, понятий, принципов и концепций, согласующихся как между собой, так и с установившимися в машиностроении правилами.

В отличие от проектирования, исследования и изобретательства под конструированием понимается разработка конструкторской документации, объем и качество которой позволяют изготовить машину с соблюдением всех требований машиностроительной технологии. С течением времени эта отличительная особенность приобретает все более важное значение. Всего лишь 25–30 лет назад для того, чтобы изготовить сконструированную машину, конструктор был обязан предоставить изготовителям графические материалы (чертежи, схемы) и спецификации [458, с. 18].

Специальными исследованиями установлено, что обновление существующих видов машин происходит через 5–7 лет, а теоретические основы создания машин и тенденции развития принципов действия этих машин сохраняются в течение 10–15 лет [458].

Общие тенденции развития техники, отчетливо проявившиеся во второй половине XX в., учитывают также и необходимость резкого сокращения времени на создание новых образцов машин от идеи до их серийного производства. Современной эпохе свойственны тенденции роста параметров машин (скоростей, температур, давлений, единичных мощностей и т. д.).

Конструирование машин и механизмов длительное время носило характер индивидуального мастерства, основанного на интуиции и сообразительности отдельных умельцев, конструкторов и изобретателей. Процесс конструирования при этом осуществлялся в ходе изготовления машин с уточнением кинематики, формы и размеров деталей «по месту» на основе многократного экспериментального опробования. В дальнейшем возникла необходимость выработать основные принципы, положения и правила, которыми необходимо руководствоваться при конструировании машин [458, с. 5].

Такие изменения происходили в направлении развития теории механизмов и машин, теоретических основ конструирования деталей машин и других теоретических наук, а также по линии совершенствования организации конструкторских работ.

В последние годы в проектировании судовых машин и механизмов наметилась тенденция повышения мощности и увеличения скоростей движения деталей. Это, в свою очередь, привело к повышению уровня нагрузок и частоты их приложения. Например, скорость подъёма (выбирания каната) в грузовых лебёдках увеличилась в 3,5 раза по сравнению с паровыми, а в траловых — в 3,4 раза [202, с. 411]. Надёжность машин и механизмов при этом является одним из важнейших показателей и зависит от прочности элементов и деталей, которая обеспечивается выбором материалов, формы и размеров деталей, исключающих недопустимо большие деформации, поверхностные разрушения и преждевременные поломки.

В связи с этим возросли требования к прочностным расчётам, которые всё более усложняются, т.к. возникает необходимость учёта многих факторов, вли-

яющих на конструкцию машин и механизмов, а именно: режимов работы, механических свойств материала, технологических требований, условий нагружения и эксплуатации и многих других факторов.

По мере накопления опыта все острее стало ощущаться отсутствие общей методологии, которая соединила бы теорию и практику конструирования машин, с одной стороны, и общие тенденции развития машиностроения, общетехнические и социальные проблемы — с другой.

Современные конструкции машин теперь не являются результатом труда только конструкторов. В сложном процессе их создания в наши дни участвуют наряду с конструкторами специалисты других областей: системотехники, инженерной психологии, научно-технического прогнозирования, эргономики, технической эстетики, теории сетевого планирования и многих других. Все это в ряде случаев столь сильно влияет на ход работы, что привычные представления о методах конструирования существенно меняются [458, с. 6].

С развитием техники организационно-технические принципы создания машин непрерывно изменяются и совершенствуются вследствие внедрения новых способов изготовления машин, усложнения их конструкций и условий сбыта, более полного изучения ряда технических и экономических вопросов [458]. В создаваемых конструкциях машин необходимо учитывать требования, предъявляемые к ним на современном этапе, а также особенности конструирования в свете последних научных теорий.

Процесс создания машины состоит из следующих этапов: обоснования необходимости создания новой машины; научно-технических исследований; разработки конструкторского проекта; изготовления, испытания и доводки опытных образцов. Необходимость создания современной машины вытекает из общих условий развития техники применительно к конкретному случаю. Как считает В. И. Борисов [458, с. 11], в ходе разработки обоснования важно учесть не только требования текущего момента, но и возможность изменения технологии в будущем, определяющую потребности в таких машинах, а также факторы, влияющие на развитие техники в данном направлении.

На втором этапе создания машины проводят научные исследования технических положений, которые будут использоваться в конструкции машины. Перечень вопросов, подлежащих изучению на данном этапе, зависит от вида, назначения и условий работы машины, от специфических особенностей ее конструкции, степени их изученности и т. п. В одних случаях исследования ведутся в направлении поиска рационального принципа действия машины, в других — в направлении улучшения рабочих характеристик, в третьих — изучаются возможности использования в конструкции будущей машины изделий или материалов, выпускаемых промышленностью, в четвертых — проверяется пригодность тех или иных изобретений для данной конструкции и т. д.

Материалы первых двух этапов процесса создания машины оформляют в виде технического задания на разработку проекта машины. Техническое задание является принадлежностью конструкторской документации, поэтому его появление

означает переход к третьему этапу — разработке конструкторского проекта. Этот документ как бы разделяет весь процесс создания машины на две части: поисковую (обоснование необходимости создания новой машины, научные исследования), отвечающую на вопросы, нужна ли машина и какой принципиально она может быть, и созидательную (разработку конструкторского проекта, изготовление, испытание, доводку), отвечающую на вопросы, какой она должна быть и какой она в действительности будет.

Техническое задание не является догмой. В процессе конструкторских работ могут быть найдены более рациональные инженерные решения некоторых вопросов, требующие изменений в этом документе. Оно должно содержать все исходные данные, необходимые для разработки проекта машины, но не более. Необходимо строго следить за тем, чтобы в техническом задании не было описаний конкретных конструкций, сковывающих творчество конструкторов и мешающих им в поисках нового.

Изготовление, испытание и доводка являются завершающим этапом создания новой машины. Практика показывает нецелесообразность изготовления большого числа машин по новой, не прошедшей производственной проверки конструкторской документации. Такую проверку конструкторский проект проходит при изготовлении и испытании первого, опытного образца машины. На этом этапе создания машины вместе с качеством конструкторской документации оцениваются инженерные замыслы и конструкторские решения, заложенные в проект при разработке [458, с. 15].

Как отмечают авторы работ [92, 472, 473], экспериментальные (натурные) испытания СПМ по исследованию нагрузок, действующих на траловый комплекс, являются предпочтительными, несмотря на всю их сложность и трудоемкость.

Проектирование — процесс создания машины в схемах, чертежах, расчетах и других документах, правила разработки которых утверждены комплексом стандартов ЕСКД [457, с. 4]. Проектирование — это ответственный этап в «жизни» машины: от правильности решения комплекса задач, возникающих при разработке проекта, зависят надежность и эффективность спроектированного изделия. В процессе проектирования любого объекта вырабатываются пробные решения, представляющие собой предварительный проект. Как отмечали Б. Клейтон и Р. Бишоп [148, с. 6], они должны быть проверены аналитически на соответствие проекта предъявляемым к нему требованиям. По данным анализа предварительный проект изменяют. Измененный проект вновь анализируется, и весь процесс повторяется до получения проекта с удовлетворительными характеристиками, годного для более подробной проработки деталей. Чередование синтеза и анализа характерно для любого проектирования, даже если это требует тщательной и трудоемкой проверки проекта на каждой стадии. До окончательной разработки основного, базового варианта проекта часто требуется одновременная проверка нескольких вариантов [148, с. 6].

В современной мировой теории и практике проект в широком понимании процесса проектирования толкуют как целенаправленную смену произвольной си-

стемы через перевод её из одного состояния в другое согласно выдвинутым ограничениям и целям; проект в узком понимании — как план выполнения работ по осуществлению этого изменения. Соответственно под процессом проектирования понимают разработку и реализацию проекта.

Вопросы методологии приобрели в становлении проектирования первичный характер и заняли важное место в трудах И. Г. Бубнова, А. Н. Вашедченко, В. Л. Поздюнина, А. И. Балкашина, Л. М. Ногида, В. В. Ашика и др.

Для анализа проекта необходимо точно определять систему условий и данных, например, описывающую работу судна, и критерии, к которым надо стремиться. На ранних стадиях проектирования судна, как отмечали Б. Клейтон и Р. Бишоп [148], часто приходилось решать вопрос: какова цель проектирования? Является ли целью создание судна с наилучшими техническими характеристиками, или она состоит в том, чтобы обеспечить судну минимальную строительную стоимость или эксплуатационные расходы?

Классификация методов инженерного проектирования приведена в табл. 5.1 [173].

Определив систему, подлежащую анализу, и выбрав критерии, обычно разрабатывают математическую модель объекта, основанную на известных уравнениях Ньютона, Бернулли, Эйлера и др. и характеризующую его поведение при определенных внешних воздействиях [148]. Математическая модель позволяет при минимальных затратах времени и средств теоретически проверить по выбранному критерию проект с учетом любых его изменений без необходимости строить и испытывать физическую модель; иногда для пересчета можно даже использовать прототип.

В отечественной практике под проектом чаще всего понимают детально разработанный и документально оформленный план сооружения или конструкции; иногда проектом называют просто план решения проблемы. Вместе с тем толковый словарь Вебстера определяет проект (project, от латинского projectus — «брошенный вперед») как «что-то, что задумывают и планируют, большое предприятие» [173]. Словарь по управлению проектами «Dictionary of Project Management» определяет проект как «деятельность, направленную на смену любой системы соответственно к поставленным целям» [173]. В «Кодексе знаний об управлении проектами», разработанном в 1987 г. Институтом управления проектами (Project Management Institute, США), приводят такое определение проекта: «Проект представляет собой некоторую задачу с определенными исходными данными и нужными результатами (целями), что предопределяют характер её решения».

Более корректное определение проекта приведено в [173]: «Проект включает в себя замысел (проблему), средства его реализации (решение проблемы) и результаты, которые получают в ходе его реализации». В сущности говоря, проект представляет собой логически взаимосвязанную последовательность действий по достижению поставленной цели, а проще говоря, проект — это то, что изменяет наш мир.

Таблица 5.1. Методы инженерного проектирования [173]

№	Цель, результат проектирования	Функция в процессе проектирования	Анализ проектной ситуации	Изменение проектной ситуации	Генерирование идей, решений
1	2	3	4	5	6
1.	Модернизация или создание нового объекта проектирования	Выбор и формулирование проектной задачи по совершенствованию объекта проектирования	1. Структурно-элементный анализ и матрица взаимодействий. 2. Стоимостной анализ. 3. Функционально-стоимостной анализ (ФСА). 4. Групповой анализ ситуации. 5. Проектирование новых функций. 6. Функциональный анализ. 7. Метод цепочек функций	1. Метод контрольных вопросов. 2. Граф взаимодействий. 3. AIDA. 4. Метод трансформации систем. 5. Карта мыслей. 6. Функционально-идеальное моделирование	1. Проектирование новых функций. 2. AIDA. 3. Групповое принятие решений. 4. Метод контрольных вопросов
2.	Модернизация совершенствуемого объекта проектирования через поиск «узких» мест	Поиск узких мест объекта проектирования и формулирование задач по их устранению	1. Обратный мозговой штурм. 2. ФСА. 3. Анализ индекса ненадёжности элементов по Кирку. 4. Групповой анализ ситуаций. 5. Причинно-следственная диаграмма	1. Метод трансформации систем. 2. Карта мыслей	1. Групповое принятие решений. 2. Карта мыслей
3.	Совершенствование конкретной характеристики объекта проектирования	Решение проектной задачи	1. Морфологический анализ. 2. Групповой анализ ситуации. 3. Функциональный анализ ситуации. 4. Метод цепочек функций	1. Метод трансформации систем. 2. Карта мыслей. 3. Метод ликвидации безвыходных ситуаций. 4. Функциональный анализ	1. Мозговой штурм. 2. Синектика. 3. Морфологический анализ. 4. Метод контрольных вопросов. 5. Алгоритмические методы на базе ТРВЗ
4.	Поиск и устранение причин конкретного дефекта	Формулирование и решение задач по её устранению	1. Групповой анализ ситуации. 2. Причинно-следственная диаграмма. 3. Диверсионный подход	1. Метод трансформации систем. 2. Метод предупреждения появления ошибок. 3. Метод ликвидации безвыходных ситуаций	1. Метод предупреждения появления ошибок. 2. Метод ликвидации безвыходных ситуаций. 3. Мозговой штурм. 4. Синектика. 5. Алгоритм решения исследовательских задач
5.	Выявление причин явления	Научная гипотеза	1. Групповой анализ ситуации	1. Метод контрольных вопросов. 2. Метод трансформации систем	1. Алгоритм решения исследовательских задач

До окончательной разработки основного, базового варианта проекта часто требуется одновременная проверка нескольких вариантов. Например, при проектировании судов решение положить в основу проекта тот или иной тип судна является результатом их сравнительного анализа по экономическим или каким-либо другим критериям [148]. Отброшенные варианты далее не рассматриваются, если только результаты технического проектирования не приведут к необходимости вернуться к одному из них.

На рис. 5.1 приведена схема решения задачи проектирования на базе системного подхода [145].

Авторы [173, с. 10] считают, что проект начинается с осознания потребителем определённой нереализованной потребности, удовлетворение которой и составляет цель проектирования, и возникновения идеи её реализации в условиях, которые существуют.

Любую техническую систему (ТС), как отмечает В.П. Тарасик [187], можно рассматривать как совокупность элементов и совокупность связей, образующих структуру объекта. Классификация технических систем выделяет системы: естественные и искусственные, управляющие и управляемые, развивающиеся и лишенные развития, стабильные, функциональные, динамические и т. п. При определении понятия «система» большинство авторов придерживаются приблизительно одного определения, что же касается понятия «проект», то здесь существует несколько точек зрения.

Формальные правила проектирования часто помогают проектировщику избежать различных ошибок. Эти правила — результат многолетнего опыта. Но всякий опыт имеет двоякую ценность. Если опыт используется разумно, т. е. подвергается сомнению и проверяется, он помогает избежать ненужной работы.



Рис. 5.1. Схема решения задачи проектирования на базе системного подхода [145]

При разработке проекта необходимо использовать конструктивную преемственность, т. е. опыт проектирования подобных машин в данной и смежных отраслях народного хозяйства [457]. Для этой цели разрабатывают графики изменения основных параметров машины по годам, конструктивных решений отдельных ее элементов, запасов прочности, надежности и др. Анализ и экстраполяция подобной информации позволяют составить довольно четкое представление о том, каковы будут параметры машины и их конструктивное решение через несколько лет. Использование конструктивной преемственности ни в коей мере не должно ограничивать творческую инициативу конструктора, наоборот, оно представляет огромное поле деятельности, где оценивают разработанные и проверенные решения и на их основе находят новые.

Проектирование произвольной ТС состоит из трех основных этапов:

– осознание необходимости создания системы, т.е. определение цели проекта;

– обоснование исходных данных для проектирования (технических условий, технического задания), в состав которых входят параметры системы и ограничения на них;

– собственно проектирование системы, которая бы удовлетворяла обоснованным исходным данным.

Оно делится на этапы создания концепции проекта (фаза концептуального проектирования); определение и решение основных задач проекта на уровне моделей (фаза технического проектирования); проверку полученных результатов и корректировка выбранных средств (фаза тестирования); планирование и реализация проекта (фазы планирования и подготовки производства; производства и эксплуатации; утилизации) [173].

После очерчивания концепции проекта начинается фаза технического проектирования, которая состоит из следующих основных этапов [173]:

– формулирование проектных задач;

– анализ задач и определение методов их решения;

– решение задач.

Формальные правила проектирования могут помочь и часто действительно помогают проектировщику избежать различных ошибок. Эти правила — результат многолетнего опыта. Но всякий опыт имеет двоякую ценность. Если опыт используется разумно, т. е. подвергается сомнению и проверяется, он помогает избежать ненужной работы. Физические свойства элементов ТС описываются компонентными уравнениями. Параметры компонентов реальной физической системы обычно непостоянны и представляют собой некоторые функции фазовых координат и их производных [187, с. 338]. Для осуществления проектирования конкретного технического объекта необходима его математическая модель и формализация понятия «оптимальный». В этом и заключается существо постановки задачи.

Особенностями исследования технического объекта (ТО) как системы являются [173]:

– вытекающая из понятия целостности необходимость рассмотрения среды (которой противопоставлена данная система), надсистемы и элементов (подсистем);

– понятие связи, конкретизирующее понятие целостности (необходимо наличие в системе двух и более типов связи, например, связей временных, пространственных, функциональных и т. д.);

– понятие структуры и организации системы, к которым приводят совокупность связей и их типологическая характеристика;

– характеристика структуры системы как по «горизонтали» (связи между однопорядковыми компонентами системы), так и по «вертикали» (деталь – узел), что приводит к понятию уровней системы и их иерархии;

– управление — разнообразные по формам способы связей уровней, обеспечивающие нормальное функционирование и развитие системы;

– связанная с наличием управления необходимость установления цели и целесообразного поведения системы;

– присутствие источника преобразования системы или ее функций обычно в самой системе (наиболее существенной чертой целого ряда системных объектов является их самоорганизация);

– проблема соотношения «функционирования» и «развития» объекта.

Системный подход к ТС означает восприятие этой системы как единого целого, во всей совокупности её элементов, с учётом всех связей и системных особенностей. Системный подход объединяет [173, с. 74–75]:

– компонентный подход, который изучает поэлементный состав системы;

– структурный подход, который изучает взаимное расположение в пространстве и времени;

– функциональный подход, который изучает функциональное взаимодействие подсистем и элементов;

– диагностический подход (комплексный анализ ресурсов системы и затрат на реализацию функций);

– эволюционный подход, который изучает генезис системы.

Проектант должен исходить из следующих основных правил проектирования [457, с. 5-6]:

– проектируемая машина по технической и массогабаритным характеристикам, полезной отдаче, уровню надежности должна превышать эти же характеристики и подобные им лучших отечественных и зарубежных аналогов;

– проектируя машину, следует придавать ей стройные архитектурные формы, соблюдать требования технической эстетики и внешней отделки;

– органы управления и контроля располагать в месте, удобном для обзора и манипулирования;

– кинематическая и силовая схемы должны быть просты и высоконадежны в работе;

– обеспечить безопасность персонала, обслуживающего машины;

– ремонтопригодность должна быть такой, чтобы обеспечивалась хорошая разборка и сборка машины, а также доступность к местам осмотра и смазки при техническом обслуживании;

– спроектированная машина должна обладать высокой эффективностью и полезной отдачей;

– в конструкцию машины надо ввести автоматику, дистанционное управление, работу в комплексе с роботами, управление от ЭВМ, если этого требуют условия работы машины;

– всеми возможными средствами обеспечить равную долговечность всем элементам (деталям) машины, определяемую предельным состоянием, в целях создания безремонтной машины;

– стремиться к сокращению типажного ряда машин, добиваясь удовлетворения потребностей отрасли минимальным числом типоразмеров машин;

– использовать принцип агрегатности конструирования: машина должна состоять из отдельных агрегатов, которые монтируются в собранном виде;

– обеспечить полную взаимозаменяемость деталей агрегатов, исключая подгонку при сборке;

– обеспечение прочности деталей должно достигаться не за счет увеличения размеров, а за счет использования материалов повышенной прочности, применения современных технологий, выбора наиболее рациональных форм деталей с наилучшим использованием в них материала, применения различных способов упрочнения;

– в парах трения композиция материала должна быть такой, чтобы они изнашивались минимально;

– при конструировании деталей избегать мест концентрации напряжений, а если это не удается, применять способы, снижающие их;

– вводить в конструкцию упругие элементы для снижения динамических нагрузок;

– обеспечить нормальный температурный режим работы машины с помощью увеличения поверхности теплоотвода, охлаждения масла, обдува корпуса и т. п.;

– не допускать перегрузок машины, для чего предусматривать в конструкции следящие устройства по параметру нагружения, автоматические регуляторы, предохранительные и предельные устройства, исключающие возможность эксплуатации на опасных режимах;

– избегать периодической смазки ответственных пар трения, определяющих общий уровень надежности машины, предусматривая в конструкции автоматическую подачу смазки;

– обеспечить влаго- и пылезащищенность конструкции судовых машин, а также виброзащиту;

– использовать в резьбовых соединениях надежные устройства, предупреждающие самоотвинчивание; соединения, расположенные в труднодоступных местах, контрить методом позитивного стопорения (стопорные штифты, шплинты, отгибные шайбы и т. п.);

– избегать применения кинематических элементов с прямолинейным поступательным движением, заменяя его вращательным;

– экономить дорогостоящие и дефицитные материалы, используя их заменители, не снижающие прочности и надежности элементов конструкции;

– конструировать деталь с учетом технологии ее изготовления.

Основой для проектирования машины служат техническое задание (ТЗ), определяющее параметры машины, область и условия ее применения, которое утверждает заказчик; техническое предложение, выдвигаемое проектной организацией или группой конструкторов; научно-исследовательская работа или созданный на ее основе экспериментальный образец; авторские свидетельства на изобретения [457, с. 7].

На рис. 5.2 приведен алгоритм процесса проектирования объекта на примере буровых судов, предложенный В.П. Шостаком [102, с. 210].

Исследования и разработки по созданию систем автоматизации проектно-конструкторских работ [28] направлены на использование возможностей ЭВМ в поиске наилучших проектно-конструкторских решений. Как правило, система автоматизированного проектирования как бы копирует ручную (безмашинную) технологию проектно-конструкторских работ, либо эти возможности значительно недооцениваются и соответственно недоиспользуются. Как отмечается, указанные возможности, по-видимому, лучше всего реализовываются путем применения комплексного оптимизационного подхода при проектировании технических объектов и технологических процессов. Его суть состоит в том, что в процессе проектирования выделяются по возможности все ситуации, связанные с выбором наилучшего проектно-конструкторского решения, и для каждой ситуации решается задача определения оптимального решения, причем в процессе постановки таких задач стремятся максимально расширить множество рассматриваемых решений. Формализация процесса проектирования на основе математического моделирования позволяет его автоматизировать. Одним из основных компонентов системы автоматизированного проектирования (САПР) является математическое обеспечение, включающее математические модели объектов проектирования и их элементов, методы и алгоритмы выполнения проектных операций и процедур [187]. В результате процесс формирования математической модели оказалось возможным возложить непосредственно на ЭВМ.

Развитие автоматизированного проектирования прошло несколько стадий. Были разработаны единые подходы к получению математических моделей для целых классов ТО, и эти подходы удалось формализовать. Основные усилия были направлены на разработку стратегии и методологии автоматизированного проектирования. В качестве примера можно привести схему типового маршрута проектирования ТО в САПР (рис. 5.3) [187, с. 19].

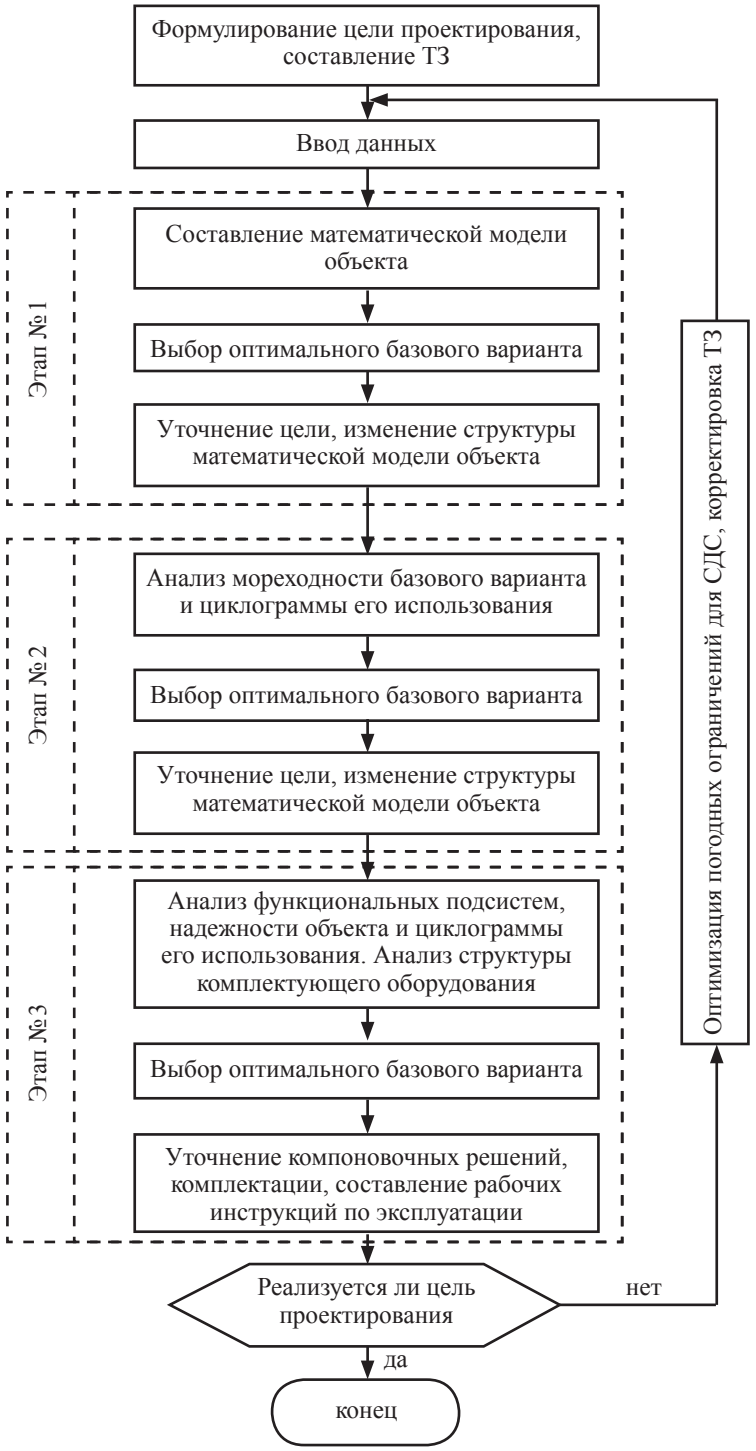


Рис. 5.2. Схема алгоритма процесса проектирования объекта [18, с. 210]

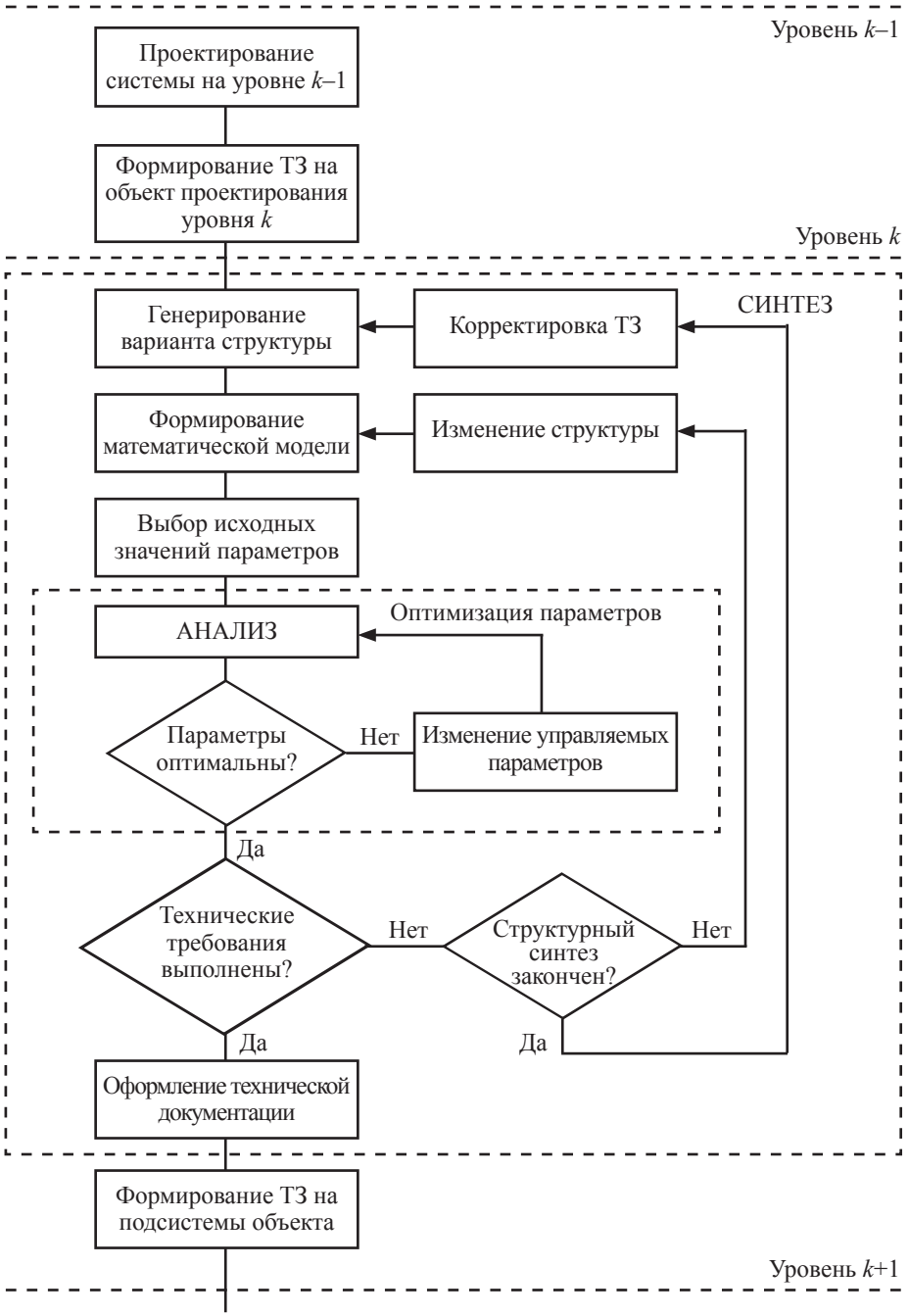


Рис. 5.3. Схема типового маршрута проектирования ТО в САПР [187]

Вначале ЭВМ применялась лишь для выполнения вычислений по методикам, ориентированным на ручное решение [187]. Это не вносило ничего нового в процесс проектирования, а лишь ускоряло выполнение отдельных его этапов. Затем начали использовать математические модели, позволяющие имитировать функционирование объектов проектирования, что позволило обеспечить повышение точности получаемой информации, организовать поиск оптимальных проектных решений и достичь универсальности описания отдельных проектных операций и процедур. Организационный аспект проектирования в таком случае отображается в блочно-иерархическом подходе к проектированию, на основе которого осуществляется декомпозиция не только объекта проектирования, но и самого проектного процесса, что даёт возможность распределить проектные работы между отдельными исполнителями.

В таком понимании проектирование складывается из комплекса исследовательских, расчётных и конструкторских работ, выполнение которых является необходимым и достаточным для получения такой совокупности описаний.

В [187] указываются также три типичные ситуации, которые часто имеют место в проектно-конструкторских разработках и имеют иерархическую соподчинённость, которым соответствуют три уровня оптимизации ТС. Первый уровень оптимизации состоит в выборе наилучшей руководящей технической идеи или принципа действия проектируемой ТС; второй уровень — в поиске наилучшей структуры или схемы в рамках выбранного принципа действия; третий — в определении наилучших значений параметров для выбранной структуры (схемы).

Как считает многие исследователи, полностью формализовать и автоматизировать процесс проектирования практически невозможно и нецелесообразно. На этапах разработки концепции технической системы, формирования технического задания, выбора технического решения, синтеза структуры, принятия решений и др. действия конструктора, основанные на его опыте и интуиции, как правило, непредсказуемы и не поддаются формализации.

Как отмечают В. В. Александров и Н. Д. Горский [112, с. 3], практика показывает: пользователи предпочитают простейшие методы обработки имеющейся информации и часто не могут решить поставленную задачу не из-за отсутствия подходящего алгоритма, а из-за незнания того, что именно этот алгоритм предназначен для решения их задачи. Некомпетентность в области обработки данных проявляется на этапе интерпретации полученных результатов. Успешно такую интерпретацию может проводить лишь человек (или коллектив), хорошо знающий как природу исходных данных, так и методы их обработки. В настоящее время эти условия, как правило, отсутствуют, что часто приводит к неверным выводам из верных результатов и, как следствие, к неправильной постановке дальнейших исследований.

Возможность автоматизации обработки экспериментальных данных связана с существованием объективных зависимостей между исследуемыми явлениями (процессами) и данными, косвенно эти явления (процессы) отражающими [114, с. 6]. Вся сложность проблемы обработки данных состоит в этой «косвенности», которая требует различных математических приемов для определения сути

исследуемого явления, т. е. описания его с помощью той или иной математической модели. В то же время априорно, как правило, неизвестно, какая из математических моделей обычно подходит для данной задачи. Большинство известных пакетов прикладных программ обработки данных (например, ОТЭКС, BMDP, SSP) представляют собой с позиций пользователей неупорядоченное множество алгоритмов, каждый из которых в той или иной мере отражает определенную математическую схему (модель) обработки данных, о которой исследователю практически ничего не известно [114, с. 7].

При проектировании машины особое внимание должно быть уделено выбору конструкции, в основу которого положены факторы экономической эффективности, малого энергопотребления, низкой стоимости технического обслуживания и эксплуатации, обеспечения требуемого уровня надежности. При этом также используется вариантный способ разработки конструкции.

При разработке конструкции конструктор зачастую прибегает к методу инверсии, суть которого заключается в обращении функции, формы и расположения деталей. В некоторых конструкциях целесообразно поменять детали ролями, например, направляющую деталь сделать направляемой, охватывающую — охватываемой, неподвижную — подвижной и т. д. В результате такого приема разрабатываемая конструкция приобретает новые свойства, которые могут выгодно отличать ее от предыдущей по прочности, надежности, габаритам и т. д. С помощью инвертирования появляется возможность поиска новых решений, в результате которых рождается новая конструкция, наиболее полно отвечающая поставленным требованиям.

5.2. Теоретические основы проектирования гибких связей

При проектировании и эксплуатации МПС, например, ППС с СПА как разновидности МПС, стационарные задачи, в которых объекты занимают неизменное положение в пространстве при неизменных характеристиках потока и воспринимают постоянные во времени внешние нагрузки, являются квазистатическими [14]. Состояние системы описывается уравнениями статики, хотя действующие на нее силы по своей природе гидродинамические. Динамическая задача для рассмотренной системы связана с гидродинамической. Опыт проектирования и эксплуатации систем с СПА для задач шельфа показывает, что в уравнениях движения элементов таких систем допустимо использование упрощенных выражений для внешних сил, присоединенных масс жидкости, гидродинамических сил потока жидкости. Динамика процессов учитывается инерционными членами уравнений движения, динамическими составляющими элементов систем в жидкости.

В расчётах КТ, канатов и шлангов их телесность, поперечные размеры сечения указываются только при определении гидростатических и гидродинамических внешних нагрузок. При определении пространственной формы и внутренних усилий этих линий их моделируют абсолютно гибкой нитью, обладающей, тем не менее, собственной массой, весом, гидродинамическим сопротивлением [122].

Анализ проектных задач при создании МПС, например, ППС и ПБС, показывает, что значительную теоретическую сложность и наукоёмкость приобретают расчёты ГС МПС, прочности и надёжности их элементов. В связи с этим возникают задачи разработки моделей функционирования МПС в квазистационарных режимах работы, математических моделей динамики МПС, создания комплекса для компьютерного моделирования квазистационарных и динамических режимов работы МПС [411].

Развитие методов моделирования и расчета динамических нагрузок на элементы БС в экстремальных и наиболее типичных условиях эксплуатации позволяет уточнить значения коэффициентов запаса прочности, обеспечивающих необходимую прочность, надежность и долговечность. При этом возможны два подхода к проектированию БС [136, с. 34]. Первый подход состоит в улучшении прочностных характеристик составных элементов систем, например, величины разрывного усилия кабель-буксира, что позволяет эксплуатировать БС при достаточно высокой интенсивности динамических воздействий. Второй подход предполагает минимизацию статических и динамических нагрузок на БС за счет выбора оптимальных скоростных режимов буксировки, ориентации судна относительно направления распространения волн, разработки специальных стабилизирующих и СПУ и т. д. К наилучшим результатам, как считают авторы [122], приводит разумное сочетание элементов указанных подходов.

С появлением современной вычислительной техники возникла возможность развития и реализации ряда численных методов решения теоретических задач гидромеханики и математического моделирования динамики ППС, позволяющих глубоко исследовать вопросы их движения и динамики с привлечением минимального объема экспериментальных данных. К настоящему времени многие задачи гидродинамики, возникающие в процессе создания разнообразных ППС, нашли свое законченное решение [136].

Изучив соответствующую литературу по этому вопросу [425], автор не нашёл конкретных предложений. Вопросами проектирования ГС занимаются специальные компании. Потребителям предлагается целый ряд типоразмеров ГС для использования. И только тогда, когда возникает необходимость в более сложных ГС, компании-изготовители приступают к их проектированию и изготовлению [395].

Многие исследователи отмечают, что аналитические методы сейчас нельзя считать достаточно алгоритмичными, решение новых задач динамики ГС требует приложения существенных усилий и затрат времени при осуществлении математических вычислений [384]. Наиболее перспективным при этом считается применение численных методов.

ГС, находящаяся в воде и являющаяся пространственным криволинейным объектом, до приложения нагрузки сохраняет свою форму до тех пор, пока на нее не начнут воздействовать какие-либо силы. При функционировании МПС примером таких воздействий могут служить усилия на ГС судов-буксировщиков, течений, ПА или других подводных объектов (ПО), аварийные режимы работы (зацеп ГС за подводные препятствия и др.). При этом следует учитывать не только техниче-

ские условия, но и механические нагрузки на ГС, которые возникают из-за влияния ветра, волнения моря, морских течений и маневров плавсредств.

Сложные и тяжелые режимы эксплуатации гибких элементов сопряжены, как правило, с необходимостью специального изучения и определения действующих на них сил, учета нелинейности разрешающих уравнений, возможности потери устойчивости равновесия и с требованием исследования поведения системы в закритических состояниях [61, 384]. Дифференциальные уравнения, описывающие их, имеют высокий порядок и содержат нелинейности сложного вида. Поиск их решения аналитически часто становится невозможным, что побуждает широко привлекать методы вычислительной математики. Решение таких задач оказывается возможным только современными методами нелинейного анализа, применение которых побуждает к выбору модификации разрешающих уравнений, обеспечивающих алгоритмичность и эффективность используемых подходов. До настоящего времени указанные исследования не получили необходимого развития из-за отсутствия достоверных математических моделей, которые достаточно просто и эффективно реализуются в виде алгоритмов и программ для численного решения рассматриваемых задач [384]. Как считают Э. И. Блинов и др. [314], для описания влияния гидрометеосреды необходима адекватная пространственно-временная математическая модель изменения волнения, ветра и течения. Эта модель должна позволять воспроизводить реальные внешние условия как на коротких (секунды, минуты), так и на длинных (до года) интервалах времени с учетом вероятностной природы и основных характеристик гидрометеосреды.

ГС описывают, как правило, как гибкую нить. В настоящее время опубликовано много работ, в которых теория гибкой нити излагается с различных точек зрения, различной полнотой и строгостью. Некоторые из них представляют монографии, посвященные узкой проблеме, часть работ охватывает весьма широкий круг вопросов, главным образом, теоретического характера. Это такие учёные, как Н. И. Алексеев, А. С. Горшков, В. С. Живов, А. Н. Крылов, В. К. Качурин, Я. И. Коритысский, В. Е. Левин, Д. Р. Меркин, А. П. Минаков, И. И. Мигушов, В. Е. Мосолов, Я. Г. Пановко, Н. В. Салтанов, В. А. Светлицкий, В. С. Тихонов, Ю. В. Якубовский и др.

Существует обширная литература, посвящённая изучению поведения ГС в различных средах, областях деятельности. Этому посвятили свои труды М. Н. Александров, Б. А. Альтшуль, Л. С. Астахов, Г. О. Берто, В. С. Блинцов, Б. А. Бугаенко, Н. И. Виноградов, В. М. Гаврилов, М. Л. Гутман, В. И. Егоров, Ю. Д. Жуков, И. Б. Иконников, Ю. И. Калюх, Г. Ф. Камнев, П. П. Кипарский, Г. Р. Кульмач, И. Г. Лев, В. Э. Магула, А. И. Макаренко, М. З. Нисневич, В. И. Поддубный, Г. В. Пузырев, А. Н. Гурович, Ю. А. Смирнов, А. Л. Фридман, Д. А. Черненко, Ю. Е. Шамарин и др.

Автор, используя существующий опыт проектирования ГС для МПС, предлагает следующую схему, на которой приведены основные этапы проектирования ГС (рис. 5.4). На основе существующей математической модели динамики ГС МПС [391, 392, 460] появляется возможность установления её предполагаемой формы, что позволит определить напряженно-деформированное состояние ГС.



Рис. 5.4. Основные этапы проектирования ГС МПС

На рис. 5.5 приведены теоретические основы методологии проектирования ГС МПС.

С целью совершенствования методов проектирования ГС предлагается следующий алгоритм проектирования ГС МПС (рис. 5.6).

Он состоит из следующих этапов [395]:

1. Процесс проектирования ГС МПС начинается с выяснения назначения ГС в системе: место и район эксплуатации, время и длительность (период) эксплуатации.

2. Затем осуществляется формулирование требований к ГС: тип ГС; материалы, из которых изготовлена ГС; необходимая длина ГС L, м; диаметр ГС D, мм; плавучесть ГС; сопротивление ГС; изменяемая жёсткость ГС по длине; прочность ГС на разрыв, Н; максимальная нагрузка на ГС, Н; и др. Здесь основой может послужить разработанная автором ранее классификация КТ, применяемых для подводных исследований.

3. Формулирование ограничений, налагаемых на ГС особенностями эксплуатации в морской среде: состояние моря (волнение в баллах); сила ветра $V_{в}$, м/с; температура воздуха $T_{возд.}$, °С; температура воды: $T_{вод.}$, °С; солёность воды, ‰; гидростатическое давление P, Па; максимальная глубина использования ГС H_{max}, м.

4. Выбор пространственной схемы ГС в МПС.

Рис. 5.5. Теоретические основы методологии проектирования ГС [395]

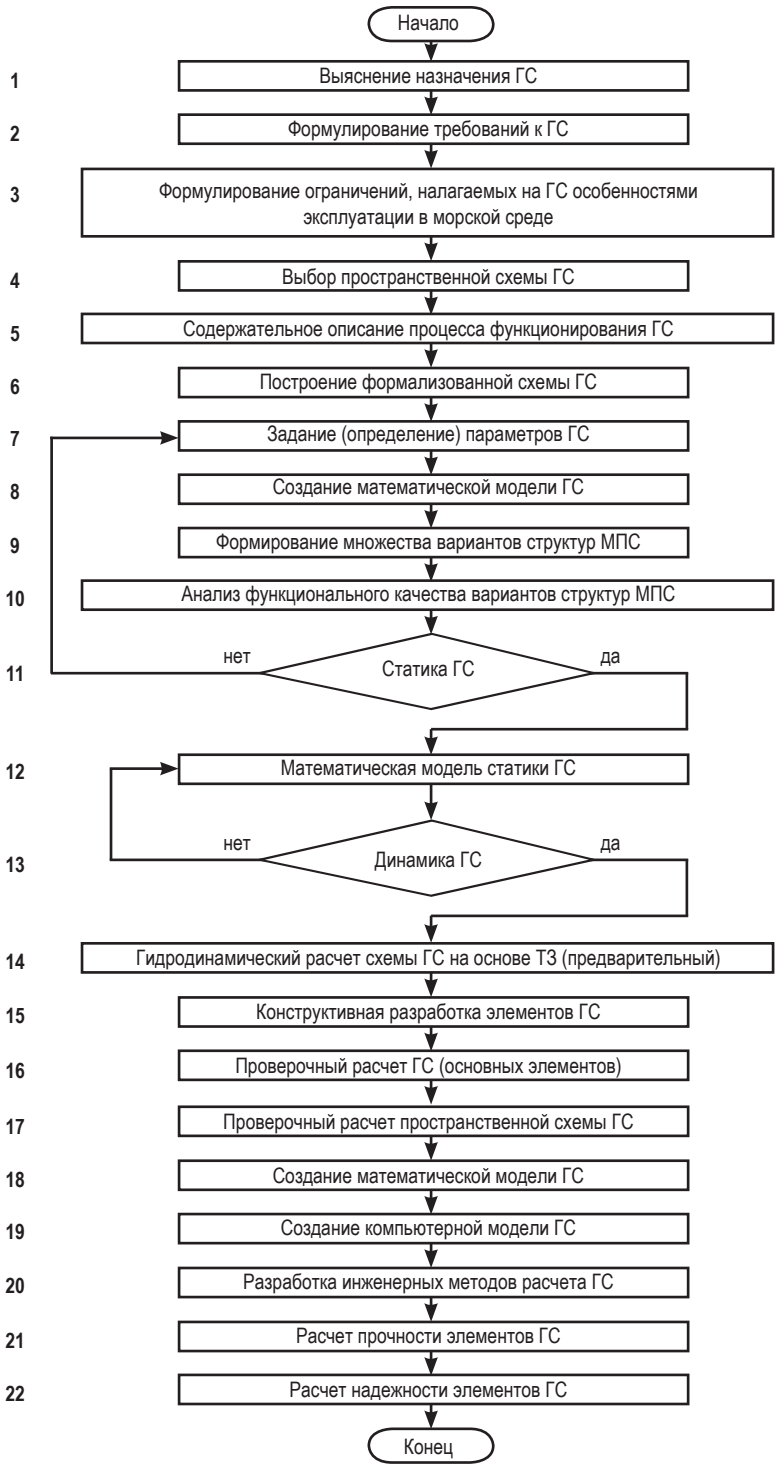


Рис. 5.6. Алгоритм проектирования ГС МПС [395]

5. Содержательное описание процесса функционирования ГС в МПС: подача (транспортировка, доставка) МПС к месту работы (эксплуатации); установка и подготовка МПС к функционированию на месте эксплуатации; начало эксплуатации (введение в действие, отладка системы); эксплуатация МПС (использование по назначению, выход на проектные мощности); окончание эксплуатации МПС и подготовка к выводу из эксплуатации; выведение МПС из эксплуатации; транспортировка к месту хранения (утилизации).

6. Построение формализованной схемы ГС. Создаются схемы ГС применительно к различным режимам эксплуатации.

7. Задание (определение) параметров ГС. Выбор их может быть осуществлён на основе п. 2.

8. Создание математической модели ГС. Описывает ГС в МПС.

9. Формирование множества вариантов структур МПС. Рассматривается максимально возможное количество структур МПС.

10. Анализ функционального качества вариантов структур МПС. Рассматривается каждый из вариантов структур МПС.

11. Статика ГС: рассматриваются статика ГС в невозмущённой стратифицированной жидкости; обжатие ГС при погружении; температурное расширение (сжатие) ГС; внешние воздействия на ГС гидрологического происхождения; растяжимость ГС; напряжения изгиба в ГС. Если учтены все критерии, переходим к п. 12. В противном случае осуществляется возврат в п. 7.

12. Математическая модель статики ГС.

13. Динамика ГС: гидродинамическое сопротивление ГС; квазистационарные режимы эксплуатации ГС; динамика ГС. Если учтены все критерии, переходим к п. 14. В противном случае осуществляется возврат в п. 12.

14. Гидродинамический расчёт схемы ГС на основе ТЗ (предварительный).

15. Конструктивная разработка элементов ГС. На основе имеющихся конструкций ГС, производимых у нас и за рубежом, осуществляется подбор наиболее подходящих по параметрам ГС; если таковых не существует, осуществляется разработка новых ГС.

16. Проверочный расчёт ГС (основных элементов). Производится предварительный расчёт основных элементов ГС на соответствие выдвинутым требованиям.

17. Проверочный расчёт пространственной схемы ГС. Производится предварительный расчёт выбранной в п. 4 пространственной схемы МПС.

18. Создание математической модели ГС. Здесь разрабатывается общая математическая модель ГС МПС, которая служит основой для создания компьютерной модели ГС.

19. Создание компьютерной модели ГС. На основе математической модели ГС разрабатывается компьютерная модель ГС, позволяющая учитывать множество параметров ГС и их изменения в процессе проектирования ГС.

20. Разработка инженерных методов расчёта ГС (компьютерная модель). Компьютерная модель расчёта ГС позволяет проектанту автоматизировать процесс проектирования.

21. Расчёт прочности элементов ГС.

22. Расчёт надёжности ГС.

На этом расчёт ГС заканчивается.

В настоящее время нет единой теории проектирования ГС МПС (надводных, подводных (буксируемых и привязных), стационарных и дрейфующих), которая бы учитывала все существенные факторы эксплуатации ГС и достоверно позволяла их проектировать.

Для решения проблемы обеспечения длительной долговечности ГС МПС необходимо совершенствовать их методы проектирования с учётом эксплуатационных факторов: характеристик волнения, конструктивных особенностей ГС, новых подходов к определению запасов прочности и т.п.

Предложенный алгоритм проектирования ГС МПС позволяет усовершенствовать существующие методы расчёта и проектирования ГС МПС [395].

Процесс совершенствования проектирования ГС МПС требует формулирования научной проблемы, научной гипотезы и концепции. Научная проблема совершенствования проектирования элементов МПС с ГС: расширение перечня и объёмов работ по изучению и освоению Мирового океана и других водных ресурсов требует разработки новых методов расчётов и проектирования ГС МПС.

5.3. Проблемы проектирования МПС с ГС

Важнейшим элементом проектирования любой ТС в настоящее время является необходимость разработки концепции. Концепция совершенствования проектирования МПС с ГС заключается в создании комплексной модели совершенствования проектирования МПС с ГС (математической и компьютерной), позволяющей учитывать внутренние и внешние факторы, оказывающие влияние на эксплуатацию ГС, и создавать более совершенные конструкции МПС с ГС.

Динамические задачи. До сих пор практически не исследована динамика ГС — модели динамики применительно к конкретным схемам (новым задачам механики ГС) и конкретным возмущениям [411]. Существующие расчёты ГС (математические модели), в том числе и проектные, используются в основном для идеальных круглых сечений. Однако в рамках проектных исследований необходимо учитывать изменение собственных характеристик ГС во время эксплуатации (изменение их характеристик во времени в течение длительной эксплуатации):

– при гидростатическом обжатии ГС меняет свою форму от идеальной окружности;

– происходит существенное растяжение ГС по длине, в том числе и жил кабелей, расположенных внутри ГС, вследствие чего меняется сопротивление ГС;

– происходит неравномерное старение и износ оболочек и оплетки кабелей ГС, изготовленных из различных материалов;

– меняется характер внешних воздействий на ГС;

– изгибная жёсткость должна также моделироваться и учитываться в математических моделях;

– необходимо учитывать поперечную вибрацию ГС в потоке воды в квазистатической и локальной динамике, поскольку при классических методах расчётов она не учитывается.

Проектные задачи. Появление новых материалов как для основных элементов конструкции ГС МПС (например, оптоволокна), так и для их оболочки (синтетические и искусственные волокна) позволяет создать ГС, имеющие совершенно новые свойства, и обеспечить с их помощью получение новых характеристик систем, в которых они будут использоваться. В связи с увеличением рабочих глубин использования ГС МПС возникает актуальность совершенствования теории и методов их проектирования, уточнения существующих методик, что обусловлено тем, что существующие методы расчёта и проектирования являются упрощёнными и не учитывают действительные нагрузки и характер нагружения ГС либо являются довольно сложными и громоздкими для конструкторов-проектантов, в связи с чем требуют значительных затрат времени для их выполнения.

В связи с этим возникает актуальность совершенствования теории и методов проектирования МПС с ГС:

1) изменение характеристик ГС МПС необходимо учитывать в реальном масштабе времени (оперативно);

2) для традиционных конструкций кабельных линий ГС может быть представлена как идеальная нить. Актуальной является задача быстрого расчёта усилий в таких нитях для задач исследовательского проектирования и использования в системах управляемых МПС в реальном масштабе времени называют концептуальным проектированием, содержание которого составляют такие этапы [173]:

– исследование и описание ситуации, которая обосновывает актуальность (необходимость или целесообразность) этого проекта, и которое содержит детальное описание неудовлетворённой потребности и причины её неудовлетворённости; описания известных способов её удовлетворения и причин её неиспользования;

– разработка концепции проекта, т. е. идеи удовлетворения потребности в виде вербальной модели технической системы (ТС), способной удовлетворить эту потребность. Создание такой системы — цель проекта, значит, на этом этапе формулируют цель проекта;

– формулирование технических условий на ТС;

– приближённая оценка стоимости, длительности проекта, круга специалистов и т. п.

При создании ММ описание движения необходимо производить на тихой воде и на волнении.

Необходимо учитывать:

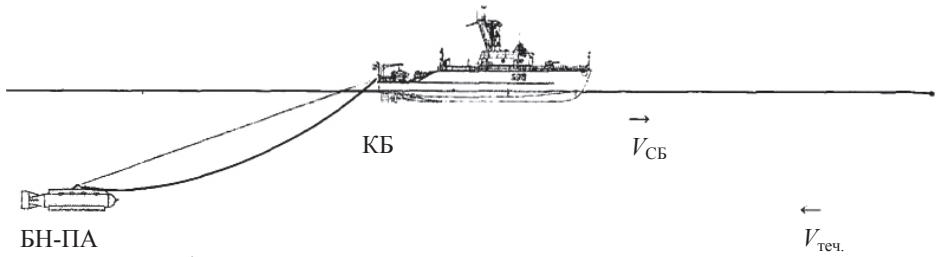
1) количество винтов СН, скорость СН;

2) место размещения СПУ на СН (на корме или на борту);

3) отсутствие связи ($L_* < L$ — без уравнения связи) или наличие связи ($L_* = L$ — возвращение тела на связь);

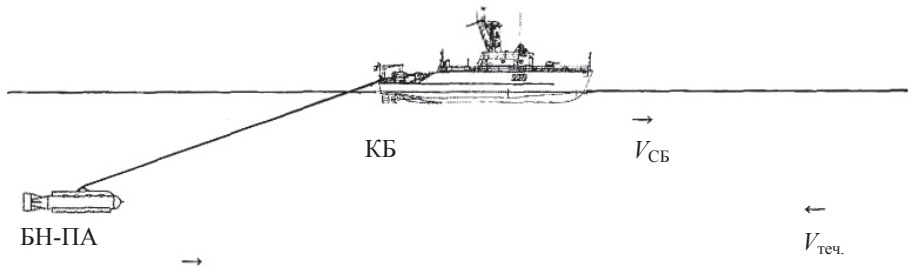
4) переход ГС и БН из водной среды в воздушную (прекращение действия выталкивающей силы, что эквивалентно погружению кабель-буксира);

Судно-буксировщик (СБ, СН) - Базовый тральщик пр. 257Д



$L_* < L$ — без уравнения связи

Судно-буксировщик (СБ, СН) - Базовый тральщик пр. 257Д



$L_* = L$ — возвращение тела на связь

5) устойчивые и неустойчивые режимы движения буксируемой системы;

6) стационарные и нестационарные режимы движения БН (изменение скорости и направления хода буксировки — курсовой угол, т.е. при маневрировании судна; периодические изменения глубины хода БН);

7) переходные процессы (переход от одного установившегося режима к другому);

8) установившиеся и неустановившиеся режимы движения (переходные, например, переход с одной глубины хода на другую за счёт изменения длины КБ — движение БС с переменными по времени характеристиками в виде колебаний, обусловленных реакцией БН на управляющее воздействие; или переход с одного режима на другой);

9) манёвры судна-буксировщика (СБ или СН) при маневрировании, что является причиной возрастания динамических нагрузок: повороты СБ; циркуляция СБ; торможение СБ; останов; резкий ход (увеличение скорости); изменение длины КБ;

10) такие эксплуатационные характеристики ПБС, как скорость буксировки ***V*** и глубину хода ***H*** ПБС.

При создании компьютерной модели ПБС возможно использование двух подходов (табл. 5.2).

При использовании компьютерной модели I похода осуществляется проверка элементов уже существующих ПБС.

При использовании компьютерной модели II похода осуществляется проектирование новой ПБС.

Таблица 5.2. Условия создания компьютерной модели ПБС

№ п/п	I подход	II подход
1.	Пространственная схема ПБС известна (существует)	Пространственная схема ПБС не известна (не существует). Выбор рациональной схемы компоновки ПБС
2.	Схема буксировки известна (существует)	Выбор рациональной схемы буксировки
3.	Условия буксировки известны	Выбор оптимальных условий буксировки (обеспечивают на данной скорости наибольшую из возможных глубин БН с учётом ограничения прочностных характеристик КБ). При этом определяется форма КБ в потоке, при которой уменьшается гидродинамическое сопротивление, а заглубляющие усилия возрастают в пределах прочности КБ
4.	СН (СБ) известен (имеется в наличии)	СН (СБ) не известен (не существует)
5.	Кабель-буксир (КБ) имеется и производится в необходимом количестве	КБ не существует и требует проектирования (ГС должна удовлетворять высоким прочностным и гидродинамическим характеристикам)
6.	Коэффициент запаса прочности ГС известен	Требуется другой параметр, т.к. КЗП даёт завышенную оценку прочности КБ, что ведёт к утяжелению КБ
7.	Необходимые элементы КБ (напр., обтекатели, соед. звенья и т.п.) имеются в наличии	Необходимые элементы КБ требуют проектирования (точное знание эксплуатационных нагрузок и характера нагружения, новые материалы и технологии изготовления)
8.	Буксируемый носитель (БН) известен (существует)	БН неизвестен (не существует и требует проектирования, при этом учитываются обтекаемость, совершенные ходовые качества, достаточное углубляющее усилие)
	Буксирная лебёдка известна (существует), $d_{леб.}=40...50d_{КБ}$ (по изгибной прочности)	Буксирная лебёдка неизвестна (необходим учёт изгибных напряжений в КБ $\sigma_{изг.}$)

Анализ проектных задач при создании МПС, например, ППС и ПБС, показывает, что значительную теоретическую сложность и наукоёмкость приобретают расчёты ГС МПС, прочности и надёжности их элементов. В связи с этим возникают задачи разработки моделей функционирования МПС в квазистационарных режимах работы, математических моделей динамики МПС, создания комплекса для компьютерного моделирования квазистационарных и динамических режимов работы МПС.

Вопросам проектирования судовых устройств и спецустройств посвятили себя М.Н. Александров, В.С. Блинцов, В.Э. Магула, Б.А. Бугаенко, В.И. Егоров, А.Н. Дмитриев, Б.А. Альтшуль, А.Л. Фридман, Г. Берто, К.С. Зайчик, С.Ф. Трунин, П.А. Боровиков и В.Н. Самарский, А.Н. Дмитриев, М.Л. Зеферман и В.И. Неретин, И.Б. Иконников, В.М. Гаврилов и Г.В. Пузырев, В.А. Коробков и В.С. Левин, А.В. Лукошков и П.П. Серебреницкий, Н.И. Виноградов,

М. Л. Гутман, И. Г. Лев, М. З. Нисневич, Б. В. Шехватов, В. П. Шостак, В. С. Ястребов, В. Ф. Журавлёв, А. Х. Тильман, В. К. Коротков, В. И. Поддубный и Ю. Е. Шамарин, Д. А. Черненко и Л. С. Астахов, Г. Ф. Камнев, Г. Р. Кипарский и В. М. Балин, И. А. Горшков и Н. И. Махорин, зарубежные исследователи и конструкторы: Г. Берто, Т. Доусон, Дж. Е. Кенни, П. Милн, Хаукс Герхард и др.

Основными чертами концепции совершенствования проектирования МПС с ГС являются:

– применение классических методов теории проектирования с учётом особенностей (специфики) проектирования МПС в зависимости от типа МПС;

– разработка математических моделей динамики ГС МПС и МПС с ГС и отражение в них характерных физических процессов в ходе создания МПС с ГС;

– разработка компьютерной модели динамики ГС МПС и МПС с ГС;

– оптимизация элементов и характеристик объекта как системы на всех уровнях ее иерархии и на всех этапах проектирования по мере накопления достоверной информации (примером такого иерархического уровня является комплектация объекта основными элементами системы (оборудованием));

– синтез классических методов и исследовательского проектирования с использованием созданных ММ и КМ, уточняющего результаты оптимизации элементов и характеристик объекта, полученные на основе разработанных математической и компьютерной моделей МПС;

– организация взаимодействия проектанта, заказчика, разработчиков головных образцов оборудования и обратная связь этапных результатов с первоначальными техническими заданиями на МПС с ГС и комплектующее оборудование. Аргументированная и согласованная корректировка заданий, т.е. использование метода последовательных приближений;

– повышение устойчивости оптимальных решений путем изучения технических возможностей МПС с ГС в аварийных ситуациях и обеспечение общей безопасности МПС с ГС.

5.4. Совершенствование методов проектирования МПС на основе применения компьютерной программы моделирования динамики МПС с ГС на примере ПБС

В практике проектирования различают эвристический и алгоритмический методы. Первый метод основан на накопленном опыте проектирования подобных конструкций и зависит от индивидуальных способностей разработчика (степени его подготовки, компетентности в данной области и др.). Эвристический метод требует значительного времени и в ряде случаев, при современном развитии техники, не удовлетворяет запросов заказчика. В целях сокращения сроков проектирования и числа конструкторов в последние годы используют алгоритмический метод проектирования систем автоматизированного проектирования (САПР) [173, с. 4].

Независимо от принятого метода разработчик (конструктор) должен на базе существующих конструктивных решений с учетом достижений науки и техники создавать новые конструкции, которые наиболее полно отвечали бы требованиям заказчика и обеспечивали эффективность и надежность спроектированной конструкции. При этом главными показателями разработанной конструкции будут: высокая производительность и степень автоматизации; прочность; надежность; малые массогабаритные характеристики; энергоемкость, простота и безопасность обслуживания, удобство управления.

Проектирование по ТЗ — это наиболее общий случай создания новых машин, поэтому качеством и компетентностью данного документа определяется технический уровень, эффективность и надежность спроектированной машины, а также соответствие ее лучшим отечественным и зарубежным аналогам. Кроме того, заложенные в ТЗ данные должны учитывать рост технического прогресса отрасли, использующей проектируемую машину, на перспективный период.

Техническое задание на проектирование обычно представляет собой вербальное (словесное) описание целей и задач проектирования объекта. Эти задачи носят оптимизационный характер.

Результатом выполнения маршрута проектирования являются проектное решение и проектные документы, содержащие информацию о структуре и выходных параметрах технического объекта и о параметрах его элементов (внутренних параметрах объекта) при заданных внешних параметрах. В общем случае задача проектирования имеет следующую математическую формулировку: определить структуру и внутренние параметры технического объекта, доставляющие экстремум некоторой скалярной функции $F(\vec{X})$ при заданных ограничениях $\vec{\varphi}(\vec{X}) > 0$, $\vec{\psi}(\vec{X}) = 0$, где $\vec{X}$ — вектор оптимизируемых параметров. Функцию $F(\vec{X})$ называют целевой функцией или функцией качества. Она количественно выражает качество технического объекта [187, с. 21].

Эффективность и качество функционирования объекта характеризуются его выходными параметрами, поэтому они выступают в роли критериев оптимальности. Так как физические свойства объекта характеризуются множеством выходных параметров, то задача оказывается многокритериальной.

Процедура постановки задачи проектирования носит неформальный характер и включает следующие этапы: выбор критериев оптимальности, формирование целевой функции, выбор управляемых (оптимизируемых) параметров, назначение ограничений, нормирование управляемых и выходных параметров [187, с. 22].

Многокритериальность задачи создает сложности формирования целевой функции и приводит к множеству возможных решений. Выделение некоторого подмножества решений задачи относится к проблеме выбора и принятия решения. Задачей принятия решения называют кортеж $\alpha = <W, \Theta>$, где W — множество вариантов решений задачи; Θ — принцип оптимальности, дающий представление о качестве вариантов, в простейшем случае правило предпочтения вариантов. Решением задачи α называют множество $W_{ок} \subseteq W$ с W, полученное на основе принципа оптимальности [187].

Процесс совершенствования проектирования ГС МПС требует формулирования научной проблемы, научной гипотезы и концепции. Проблема [207]: 1) в широком смысле — сложный теоретический или практический вопрос, требующий изучения, разрешения; 2) в науке — противоречивая ситуация, выступающая в виде противоположных позиций в объяснении каких-либо явлений, объектов, процессов и требующая адекватной теории для ее разрешения.

Важнейшим элементом проектирования любой ТС в настоящее время является необходимость разработки концепции. Концепция — способ понимания, трактования какого-то явления; основная точка зрения; основная идея освещения, ведущий замысел; система взглядов [300]. Концепция — генеральный замысел, который определяет стратегию действий при осуществлении реформ, проектов, планов, программ; комплекс положений (идей, принципов), что дают целостное представление о любом явлении и событии, которые оказывают содействие их пониманию и определяют методологию и организацию практической деятельности.

Концепция совершенствования проектирования МПС с ГС заключается в создании комплексной модели совершенствования проектирования МПС с ГС (математической и компьютерной), позволяющей учитывать внутренние и внешние факторы, оказывающие влияние на эксплуатацию ГС, и создавать более совершенные конструкции МПС с ГС.

На рис. 5.7 [300] приведены принципы формирования концепции и их содержание.

В нашей концепции использован подход концепции В. П. Шостака по проектированию буровых судов [102, с. 206-207].

На рис. 5.8 приведена схема совершенствования методов проектирования МПС с ГС.

В зависимости от типа МПС даётся описание процесса функционирования МПС, создаётся математическая модель функционирования МПС. Формирование множества вариантов структур системы будет зависеть от целей и задач, которые призвана выполнять проектируемая МПС.

Построение математической модели МПС подразумевает создание такой ММ для конкретной МПС. Выполнение критериальных исследований подразумевает определение критериев, которым должна соответствовать МПС. Выполнение оптимизационных исследований направлено на выбор наиболее оптимальной системы МПС. После этого осуществляется разработка рекомендаций по совершенствованию методов проектирования и принятие проектного решения.

№	Принципы формирования концепции	Содержание принципа
1	Принцип согласованности целей	Основная цель концепции должна быть совместная (или хотя бы не идти вразрез) с целями других концепций, которые определяют функционирование разных элементов системы, а также с глобальными целями и задачами системы.
2	Принцип полной системы	Уровень детализации, которая фиксируется в концепции положений, должен отвечать уровню детализации элемента системы, для которой она разрабатывается.
3	Принцип единства основы	Предусматривает использование сроков и понятий, которые имеют однозначное и одинаковое трактования как на уровне элемента системы, так и на равные системы в целом.
4	Принцип неполной детерминированности и стохастичности	Предусматривает отсутствие в концепции однозначных точных значений показателей и параметров элементов системы или системы в целом. Это обусловлено невозможностью точного учёта развития каких-нибудь событий, а также невозможностью владения стопроцентно всей информацией, которая касается будущей концепции.
5	Принцип развития	Положения концепции должны быть направлены на развитие каждого элемента системы и системы в целом.
6	Принцип удовлетворенности всех участников	Предусматривает, что положения концепции должны быть составлены таким образом, чтобы в период их реализации и завершения не ухудшить положение ни одной из заинтересованных сторон и прежде всего человека как высочайшей социальной ценности.
7	Принцип комплексности подхода	Заключается в необходимости рассмотрения и прогнозирования следствий реализации концепции во всех сферах жизнедеятельности человека и общества и его естественном окружении независимо от того, которой конкретно сферы касается концепция.

Рис. 5.7. Принципы формирования концепции [300]

Рис. 5.8. Схема совершенствования проектных задач (методов проектирования) МПС с ГС

5.4.1. Расчёты элементов судовых палубных механизмов (СПМ), применяемые при проектировании специальных лебёдок МПС

Все судовые устройства эксплуатируются в условиях динамических воздействий, источником которых могут быть: силовые воздействия привода; воздействия, связанные с гашением энергии перемещавшегося судна или подходящего к нему объекта; ударные воздействия масс воды; кинематические возбуждения от перемещений судна и связанного с ним объекта (груза, аппарата) на волнении [172, с. 5].

Динамические воздействия привода более характерны для стационарных механизмов. На судне они наиболее существенны для грузовых устройств при их работе у причала. В таких условиях динамические нагрузки в элементах кранов и стрел определяются почти исключительно режимами разгона и торможения груза лебедками.

Основные же динамические нагрузки в деталях большинства судовых устройств являются следствием качки судна или связанного с ним объекта на волнении. К таким устройствам относятся: якорное, буксирное, спуско-подъемное, кранцевое, спасательное, а также устройства передачи и крепления грузов. Учитывая это, именно такого рода воздействиям в дальнейшем уделено основное внимание.

Судовые устройства как реальные механические системы состоят из большого числа связанных между собой подвижных и неподвижных частей. В общем виде такие системы должны рассматриваться как совокупность бесконечного числа материальных точек, связи между которыми не являются абсолютно жесткими [172, с. 6]. Число степеней свободы такой системы бесконечно велико, и точное решение задач динамики крайне затруднительно. Это касается и прямой задачи — по заданному движению материальных точек определяется равнодействующая приложенных к ним сил, и обратной — по заданным силам и массе материальных точек определяется их движение.

На практике при выборе расчетной схемы задачу значительно упрощают, идеализируя ее, уменьшая число степеней свободы системы. Создается математическая модель системы, имеющая меньшее число степеней свободы, чем реальная. Чем выше степень идеализации и проще модель, тем более приблизительно описывается явление или процесс, но тем легче его изучить и оценить влияние важнейших конструктивных или эксплуатационных характеристик [172].

Характер нагружения элементов грузоподъемных машин определяется различным сочетанием большого количества разнообразных нагрузок, которые в условиях циклической работы машины имеют переменные значения. Нагрузки, действующие на грузоподъемные машины, подразделяются на весовые, монтажные и транспортные, ветровые, снеговые, температурные, динамические и сейсмические [158, с. 16]. Нас будут интересовать динамические нагрузки, действующие на рабочий орган рассматриваемого СПМ.

Грузовые лебёдки. Состав грузовых лебёдок.

В соответствии с функциями, выполняемыми грузовыми лебедками при погрузочных работах, их устройство можно рассмотреть на примере одной из наиболее развитых схем (рис. 5.9) [158, с. 145].

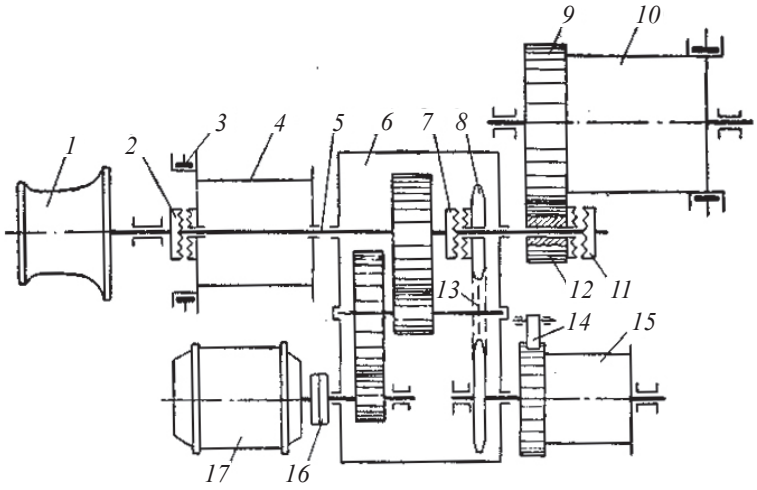


Рис. 5.9. Схема грузовой лебедки

К основным рабочим органам лебедки относятся грузовой барабан *4* для выбирания шкентеля и турачка *1*, используемая обычно для выбирания топенанта и оттяжек легких немеханизированных стрел. Турачку применяют также для перетяжки грузов по палубе, выполнения операций с люковыми закрытиями, не имеющими самостоятельного привода, и др.

Грузовые барабаны лебедок по форме аналогичны барабанам крановых механизмов подъема груза, но отличаются от них тем, что обычно канат укладывается в несколько слоев (2─4 слоя) и поэтому барабаны делают с высокими ребордами и гладкой поверхностью. Канат на грузовом барабане лебедки закреплен постоянно.

Турачка грузовой лебедки представляет собой гладкий коноидальный барабан, на который наматывается канат лишь по мере надобности. Исполнительные органы механизма приводятся двигателем *17* через редуктор *6*. Обычно в судовых лебедках используют двигатели МАП и ДПМ с пристроенными дисковыми тормозами. В механизмах, предназначенных для перегрузки ядовитых или взрывчатых веществ или кислот, а также для подъема людей и животных, должен быть предусмотрен дополнительный тормоз, который устанавливают на шкиве полумуфты *16,* связанной с редуктором [158, с. 146].

Когда лебедка работает грузовым барабаном, турачка свободна от каната и вращается вхолостую. При работе лебедки турачкой барабан должен быть неподвижным, для чего его делают отключаемым от грузового вала *5* и снабжают ленточным тормозом *3*. Турачку на грузовой вал насаживают на шпонке или шлицах.

При подготовке лебедки к работе грузовым барабаном его соединяют с грузовым валом с помощью кулачковой муфты *2* (или иным способом), а тормоз растормаживают.

Перед началом работы лебедки турачкой барабан затормаживают и отсоединяют от грузового вала. Затем несколько шлагов (витков) выбираемого каната накидывают на турачку. При вращении грузового вала один конец каната наматывается, а другой сматывается с турачки и укладывается матросом на палубу судна

в бухту или навивается на специальную вьюшку. При сравнительно небольшом усилии, прикладываемом к сбегающему концу каната 100–150 Н (10–15 кгс) при ручной укладке и 500–1000 Н (50–100 кгс) при наматывании на вьюшку, за счет трения гибкого органа о турачку на втором конце каната усилие при определенном числе шлагов может быть доведено до нескольких десятков килоньютонов (тонн). Коноидальную форму турачки выбирают для того, чтобы во время выбирания укладываемые на турачку шлаги каната постоянно соскальзывали в осевом направлении с большего диаметра на меньший.

В ряде лебедок за счет изменения передаточного числа (посредством механического переключения) редуктора обеспечивается получение двух скоростей выбирания шкентеля при работе с различными тяговыми усилиями на барабане.

Обычные лебедки ограничиваются перечисленным составом узлов и деталей, смонтированных на специальной фундаментной раме.

Лебедка, выполненная по схеме рис. 5.9, снабжена дополнительно приставными топенантным *15* и тяжеловесным грузовым *10* барабанами. Топенантный барабан приводится во вращение при включенной звездочке *5* через цепную передачу *13*. В неподвижном состоянии при выведенной из зацепления муфте *7* этот барабан удерживается стопором *14*. Тяжеловесный барабан приводится колесом *9* и шестерней *12*, соединенной с грузовым валом муфтой *11*. Этот барабан, как и основной, снабжен ленточным тормозом. При работе в составе легких стрел тяжеловесный барабан лебедки выключен. Поэтому шкентель стрелы-тяжеловеса постоянно хранится на приставном барабане, что существенно сокращает длительность вооружения тяжелых стрел.

Одним из наиболее важных органов СПМ является барабан, предназначенный для наматывания на него и хранения ГС (каната, КТ и т.п.).

В крановых механизмах подъема груза, как правило, используют цилиндрические барабаны, представляющие собой полый цилиндр с дисками, в которых размещены ступицы (рис. 5.10, *а*) [158, с. 45]. Канат наматывается на барабан в один слой. Для правильной укладки каната и повышения его долговечности на поверхности барабана нарезают (накатывают) винтовую канавку в соответствии с диаметром $d_к$ используемого каната (рис. 5.11, *б*). В случае применения сдвоенных полиспастов на каждой половине барабана нарезают винтовые канавки противоположного направления [158, с. 46].

Канат крепят на барабане различными способами. Например, в литом барабане делают прилив с отверстием (рис. 5.10, *в)* [158, с. 46], в которое с одной стороны вводят закрепляемый конец каната, а с другой — планку, прижимающую канат к барабану с помощью двух винтов.

Крепление каната самозатягивающимся клином показано на рис. 5.10, *г,* а прижимными планками — на рис. 5.10, *д.* В случае крепления каната прижимными планками на поверхности барабана делается специальный пропил краев концевых канавок так, что канат с третьей канавки от края барабана перепускают сразу на крайнюю канавку. Освобожденную канавку используют для установки болтов, крепящих прижимные планки.

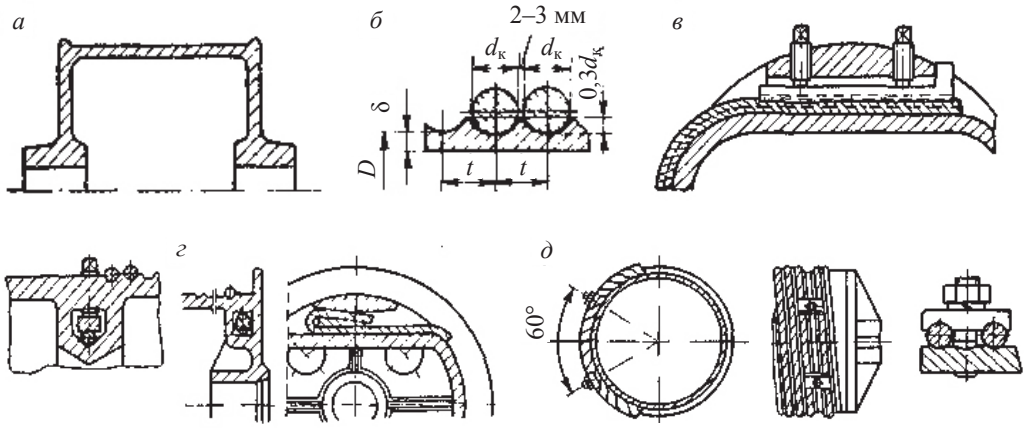


Рис. 5.10. Способы крепления канатов на барабанах

Барабаны изготовляют литыми или сварными. В последнем случае цилиндрическую часть (обечайку), выполненную из листа, приваривают к торцовым стенкам, в которые вварены точечные или литые ступицы. Барабан может вращаться на неподвижной оси или вместе с осью в подшипниках, размещенных на фундаменте. Крутящий момент в обоих этих случаях подводится к барабану через прикрепленное к нему зубчатое колесо (рис. 5.11, *а*) обычно открытой передачи. Часто в таких случаях барабан выполняют с одной ступицей, вторую ступицу совмещает с зубчатым колесом (рис. 5.11, *б)* [158, с. 47]. Существенными достоинствами обладает барабан, ось которого, вращаясь вместе с ним, одним концом опирается на обычный внешний подшипник, а другим на сферический подшипник, размещенный в расточке выходного вала редуктора (рис. 5.11, *в*). При этом крутящий момент передается барабану через зубчатую муфту. Такая конструкция менее чувствительна к расцентровкам, вызываемым деформациями фундамента.

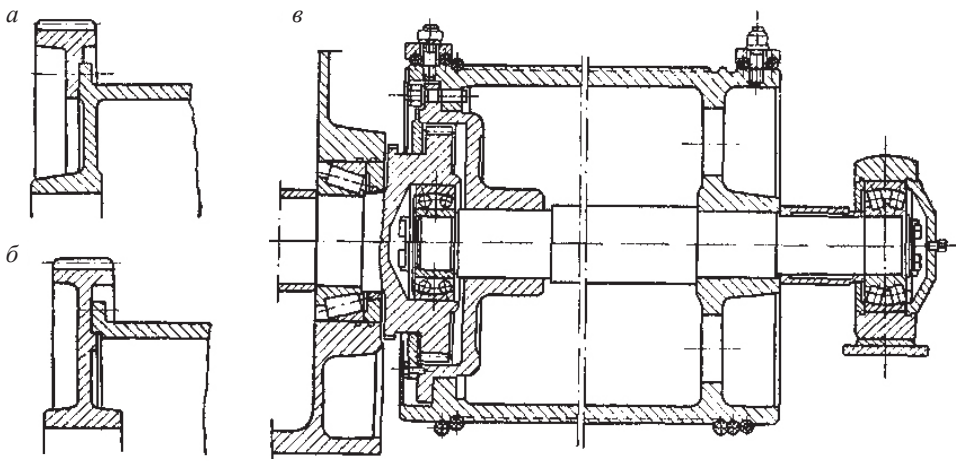


Рис. 5.11. Конструкции барабанов [158]

Значительно реже барабаны насаживают на валы. В этих случаях вал барабана приводится через глухую дисковую муфту или на вал, кроме барабана, насаживают зубчатое колесо последней ступени передачи.

Толщину стенки барабана определяют из расчета на сжатие, создаваемое радиальным давлением намотанного на него натянутого каната (рис. 5.12) [158, с. 48].

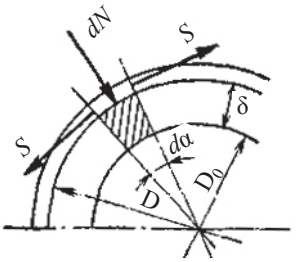


Рис. 5.12. К расчету прочности барабана

Удельное давление q каната на барабан [158]:

$$q = \frac{2S}{Dt}, \qquad (5.1)$$

где S — натяжение каната; D — диаметр барабана по дну канавки (см. рис. 5.12, *б*); t — шаг канавки.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что усилие S, равное натяжению набегающего на барабан конца каната, действует только в месте начала навивки. По мере удаления от него в направлении навитых витков натяжение каната быстро падает. Это приводит к снижению удельного давления, которое в расчетах может быть принято:

$$q = \frac{2\psi S}{Dt}, \qquad (5.2)$$

где ψ — коэффициент снижения натяжения каната, равный 0,7...0,8.

Барабан можно считать нагруженным наружным давлением толстостенным цилиндром, для которого напряжения сжатия [158]

$$\sigma_{сж} = \frac{\psi S}{t\delta} \le [\sigma_{сж}]. \qquad (5.3)$$

Допускаемые напряжения можно принять для чугуна $[\sigma_{сж}] = \sigma_в/S$, для стали $[\sigma_{сж}] = \sigma_т/S$, где $\sigma_в$ — предел прочности, а $\sigma_т$ — предел текучести материала барабана. Из технологических соображений толщина стенки чугунных барабанов должна быть не менее 12 мм.

Кроме сжатия барабан испытывает еще изгиб и кручение. Эти деформации имеют существенное значение лишь при длинных барабанах *(l/D* > 3, где *l* — длина барабана). В данном случае прочность барабана проверяют по приведенным напряжениям:

$$\sigma_{прив} = \frac{\sqrt{M_и^2 + (\alpha M_{кр})}}{W}, \qquad (5.4)$$

где $M_и$ и $M_{кр}$ — изгибающий и крутящий моменты; W — экваториальный момент сопротивления, $W \approx 0{,}8(D-\delta)^2\delta$; α — поправочный коэффициент, равный 0,75 [158, с. 48].

Найденные напряжения $\sigma_{прив}$ суммируют геометрически с напряжениями сжатия.

Некоторые особенности имеются в определении изгибающего момента при расчете прочности оси барабана. Максимальное значение изгибающего момента, воспринимаемого осью, зависит от расположения каната относительно ступиц барабана.

Расчёт механизма подъёма груза.

Исходным параметром, определяющим размеры составных частей механизма, является диаметр каната. Наибольшую нагрузку Q, действующую на канат, находят по выражению (11) [158, с. 49]:

$$S = \frac{Q}{z_n m \eta_0}, \tag{5.5}$$

где $Q = Q_0\beta$ — нагрузка, приложенная к грузозахватному устройству; Q_0 — сила тяжести полезного груза; β — коэффициент, учитывающий массу подвески с крюком, $\beta = 1{,}02...1{,}04$; $z_п$ — число полиспастов (при простом полиспасте $z_п = 1$, при сдвоенном $z_п = 2$); m — кратность полиспаста; η_0 — КПД канатной системы, $\eta_0 = \eta_п \eta_{бл}^u$ ($\eta_п$ — КПД полиспаста; $\eta_{бл}$ и u — КПД и число направляющих блоков, расположенных между барабаном и полиспастом).

Кратность полиспаста выбирают в зависимости от грузоподъемности и назначения крана, особенностей эксплуатации и других факторов [158, с. 50].

По найденной нагрузке S определяют разрывное усилие каната (формула 12 из [158, с. 50]):

$$P_{разр} = Sn, \tag{5.6}$$

где n — коэффициент запаса прочности. Для грузовых и стреловых канатов, по правилам Госгортехнадзора, эту величину выбирают в зависимости от вида привода и режима работы. При ручном приводе $n = 4$; при машинном: для легкого режима работы $n = 5$, среднего $n = 5{,}5$ и тяжелого $n = 6$. Для канатов лебедок, предназначенных для подъема людей, $n = 9$ [158, с. 50].

Диаметр каната $d_к$ берут из стандартов по разрывному усилию каната в целом при выбранном предварительно значении временного сопротивления разрыву проволок каната $\sigma_в$. В зависимости от диаметра каната определяют диаметры полиспастных, направляющих и уравновешивающих блоков, а также диаметр барабана.

Согласно правилам Госгортехнадзора минимальный диаметр блока, огибаемого стальным канатом, вычисляют по формуле (13) из [158, с. 50]:

$$D_{бл} = d_к(e - 1), \tag{5.7}$$

где $D_{бл}$ — диаметр блока, измеряемый по дну канавки; $d_к$ — диаметр каната; $e = (D_{бл} + d_к)/d_к$ — коэффициент, зависящий от типа грузоподъемной машины и режима ее работы и выбираемый для наиболее распространенных грузоподъемных механизмов по табл. 8 [158, с. 51].

Диаметр уравнительного блока допускается принимать на 20% меньше диаметра блока, определяемого по формуле (13) [158, с. 50]; минимальный диаметр D

барабана, измеренный по дну канавки, меньше на 15%. Расчетный диаметр барабана $D_б = D + d_к$.

Длина нарезной части барабана l определяется в зависимости от его канатоёмкости L, т. е. от длины навиваемого на него каната; при простом полиспасте $L = mH$ (H — высота подъема груза).

Отсюда рабочее число витков, навиваемых на барабан:

$$Z_р = \frac{mH}{\pi D_б}. \tag{5.8}$$

Общее число витков

$$z = z_р + z_{зап} + z_{кр}, \tag{5.9}$$

где $z_{зап}$ — число запасных витков, $z_{зап} = 1{,}5...2{,}0$; $z_{кр}$ — число витков, необходимых для закрепления каната, $z_{кр} = 1...3$.

Таким образом, длина барабана $l = zt$, где t — шаг канавок, $t = d_к + (2...3)$ мм [158, с. 51].

Конструктивная длина барабана увеличивается на ширину реборд, оцениваемую приблизительно $2t$. При сдвоенном полиспасте добавляется длина между нарезанными частями барабана, определяемая в зависимости от диаметра и расположения уравнительного блока. У таких барабанов реборды обычно отсутствуют. Рабочее число витков барабана при сдвоенном полиспасте

$$z_р = \frac{2mH}{\pi D_б}. \tag{5.10}$$

Частота вращения барабана (об/с) определяется по формуле (14) [158, с. 51]:

$$n_б = \frac{vm}{\pi D_б}, \tag{5.11}$$

где v — скорость подъема груза, м/с.

После нахождения указанных параметров определяют мощность двигателя (кВт) по формуле (15) [158, с. 52]:

$$N = \frac{Qv}{\nu \eta_м}, \tag{5.12}$$

здесь $\eta_м$ — КПД механизма;

Требования, предъявляемые к проектированию грузовых лебёдок.

Проектирование электрических лебедок ведут в соответствии с ГОСТ 12617- 67 [466], которым предусматривается одиннадцать моделей, различающихся тяговыми усилиями на барабане, скоростями и др. [158, с. 146].

Особенности проектирования грузовых лебёдок и расчёта их специфичных деталей.

Подход к проектированию грузовых стреловых лебедок принципиально тот же, что и крановых механизмов подъема груза [158, с. 156].

В соответствии с ГОСТ 12617-67 [466] для каждой грузовой лебедки задается тяговое усилие на грузовом барабане — нагрузка на шкентель S.

Диаметр d_K шкентеля, как и в крановых механизмах подъема груза, выбирают по разрывному усилию из табл. 8 [158] в соответствии с приведенными указаниями. Минимальное значение диаметра грузового барабана определяется как $D_{\min} = ed_к$ где коэффициент e для грузовых лебедок по ГОСТ 12617-67 [466] принимают равным приблизительно 20.

Длина барабана l между ребордами определяется его канатоёмкостью L и числом слоев укладки каната на барабан [158, с. 156]):

$$l = \frac{L}{\pi \sum D_{шл}} t + d_к, \tag{5.13}$$

где $L = L_р + L_{зап}$; $L_р$ — рабочая длина шкентеля, необходимая для обеспечения основных режимов работы лебедки; $L_{зап}$ — длина запасных витков, $L_{зап} = z\pi(D = d_к)$, где D — принятый диаметр барабана; $z_{зап}$ — число запасных витков; $z_{зап} = 3$; $D_{шл}$ — диаметр одного шлага каната (ф-ла 82 из [158, с. 156]):

$$D_{шл} = D + (2k_i - 1)d_к, \tag{5.14}$$

k_i — порядковый номер слоя; t — шаг укладки каната, $t = \beta d_к$; β — коэффициент, учитывающий деформацию каната при навивке его на гладкую поверхность барабана, $\beta = 1{,}05...1{,}10$.

Второй член $d_к$ в уравнении (81) [158, с. 156] учитывает переходный виток каната от слоя к слою. Длина барабана $l = (1{,}0...1{,}5)D_{\min}$ для обычных и $l = (2{,}0...2{,}5)D_{\min}$ для тяжеловесных барабанов.

Канатоукладчики для обычных барабанов, как правило, не предусматриваются. Их устанавливают лишь тогда, когда лебедка располагается вблизи от направляющего блока и по требованию заказчика для тяжеловесных барабанов. Описание конструкции и расчеты канатоукладчика даются в § 46 и 49. Толщина δ' стенки барабана при многослойной навивке каната может быть найдена из [158] по выражению (83) [158, с. 157]):

$$\delta' = \xi k \delta, \tag{5.15}$$

где δ — толщина барабана при однослойной навивке, определяемая из выражения (9) [158]; ξ — поправочный коэффициент: $\xi = 0{,}7$ для двух слоев, $\xi = 0{,}55$ для трех слоев и $\xi = 0{,}45$ для четырех слоев навивки каната; k — число слоев навивки.

Диаметр каната для работы на турачке выбирают, так же как и шкентеля, по заданному на него усилию, а по канату подбирают и саму турачку.

С точки зрения повышения долговечности неметаллических канатов турачки типов А и В не рекомендуются для попеременной работы этих канатов со стальными, ибо образуемые стальными канатами на поверхности турачки острые гребни быстро перерезывают неметаллический канат.

В механизмах грузовых устройств используют турачки типа А и Б, имеющие на боковой поверхности специальное отверстие для крепления коренного конца подлежащего выбиранию каната.

Спроектированная лебедка должна обеспечивать получение номинальной скорости v выбирания шкентеля с номинальным тяговым усилием S на всех слоях намотки каната на барабан. Поэтому передаточное число механизма должно быть определено по заданной скорости на первом слое навивки каната. На всех последующих слоях скорость будет повышенной и для работы на них потребуется соответственно большая мощность двигателя. Ее максимальное значение будет иметь место при навивке каната на последнем слое, по скорости на котором и следовало бы подбирать двигатель. Однако наибольшая вероятность работы лебедки — на промежуточных слоях, и поэтому обычно двигатель подбирают по скорости на среднем слое. Учитывая, что в грузовых лебедках наиболее часто используют два-три слоя навивки, подбор двигателя и расчет прочности деталей грузовых лебедок производят по скорости и моменту на втором слое навивки каната на барабан [158, с. 159].

С учетом сказанного мощность (кВт) двигателя можно найти по выражению

$$N = \frac{Sv_{\text{расч}}}{v\eta_{\text{м}}}, \tag{5.16}$$

где $v_{\text{расч}}$ — расчетная скорость,

$$v_{\text{расч}} = v\frac{D_{\text{расч}}}{D_1}, \tag{5.17}$$

D_1 — диаметр 1-го слоя навивки каната, $D_1 = D_1 + d_{\text{к}}$; $D_{\text{расч.}}$ — условный расчетный диаметр, при $k = 2$ по (82) $D_{\text{расч.}} = D + 3d_{\text{к}}$, откуда

$$v_{расч} = \frac{D + 3d_{\text{к}}}{D + d_{\text{к}}} \approx 1{,}1v. \tag{5.18}$$

5.4.2. Буксирные лебёдки

Неотъемлемой принадлежностью буксирных устройств буксирных судов является буксирная лебедка. В зависимости от требований, предъявляемых к этим лебедкам, они выполняются с некоторыми конструктивными отличиями. Наиболее проста используемая на некоторых типах буксирных судов неавтоматическая буксирная лебедка-вьюшка. Ее назначение — травить или выбирать канат при нагрузках, не превышающих номинальные (например, выбирать ослабленный в результате снижения скорости хода буксира канат или выбирать ненагруженный буксирный канат после отдачи его с буксируемого судна) и травить канат при передаче его перед буксировкой на это судно. В процессе буксировки лебедка-вьюшка должна обеспечивать удержание буксирного каната на заторможенном барабане [158, с. 221].

Буксирные устройства включают буксирные канаты, гаки, а также детали для направления и закрепления каната (кнехты, битенги, клюзы и др.) [158, с. 221-222].

Номинальные тяговые усилия на барабане для сравнительно больших лебедок этого типа невелики и принимаются равными 20–40 кН (2–4 тс). Однако в про-

цессе буксировки, которая ведется этими лебедками при заторможенном барабане и, следовательно, при неизменной длине каната восприятие динамических нагрузок возможно лишь за счет изменения его провисания. Поэтому в таких лебедках расчетные нагрузки на канат превышают указанные номинальные усилия в три–шесть раз [158].

При движении на тихой воде к буксирному канату прилагается усилие, равное сопротивлению буксируемого объекта. Во время волнения на канат, кроме указанной силы, действует сила, возникающая под влиянием продольной качки, которая приводит к изменению расстояния между точками закрепления буксирного каната (взаимное сближение и удаление судов) [12, с. 58]. Максимальное увеличение расстояния между судами может достигать размера, равного высоте волны, при которой осуществляется буксировка. В случае увеличения расстояния между судами натяжение каната существенно возрастает по сравнению с приложенной к нему тягой буксировщика [12]. Задача выбора стального буксирного каната (определения значений n и L) при заданных значениях волнения (в баллах) и тяги буксировщика решается графическим путём [12]. Разрывное усилие каната при заданных значения волнения и величины F_0 определяется как

$$F_u = nF_0, \tag{5.19}$$

где n — запас прочности каната по тяге;

F_0 — тяга буксировщика.

К недостаткам лебедок-вьюшек следует отнести резкое изменение нагрузок на канаты, грузовые валы, фундаменты и несущие элементы конструкции корпуса судна. Для затормаживания барабана при буксировке он должен быть оборудован сильным ленточным тормозом. Вместе с тем при обычных скоростях выбирания каната, нагруженного номинальным тяговым усилием, мощность привода такой лебедки невелика, а ее конструкция наиболее проста.

В целях обеспечения безопасности буксировки желательно изменять длину каната при маневрах, связанных с изменением акватории, погоды и т. п. Увеличение длины буксирного каната посредством стравливания его с барабана лебедки не представляет сложностей. Иначе обстоит дело с уменьшением этой длины. Когда перед началом выбирания каната лебедкой соответственно снижается скорость хода буксира, эта операция производится при номинальной мощности привода лебедки. В случае неизменной скорости хода буксира выбирание каната лебедкой сопровождается увеличением скорости буксируемого объекта и соответствующей затратой дополнительной мощности.

Такие операции не могут быть выполнены рассмотренными лебедками-вьюшками. Для этого используются так называемые буксирные лебедки, привод которых обладает значительной мощностью. Эта мощность должна быть тем больше, чем больше требуется скорость подтягивания буксируемого объекта [158].

Наиболее часто в буксирных лебедках применяют электрический привод, хотя имеет распространение и гидравлический привод.

По принципу действия буксирные лебедки подразделяются на простые (управляемые) и автоматические (натяжение буксируемого каната перед барабаном поддерживается постоянным автоматически).

Состав буксирных лебёдок и предъявляемые к ним требования.

Привод буксирных лебедок включает двигатель и передачу. К исполнительным органам относится главный барабан, турачки, а иногда и дополнительные вспомогательные барабаны [158, с. 223–224].

При электрическом приводе двигатели работают на переменном токе напряжением 380 или 220 В с частотой 50 Гц или на постоянном токе напряжением 220 В. В большинстве случаев исполнительные двигатели постоянного тока применяются в автоматических лебедках с электроприводом по системе генератор – двигатель.

Двигатели МАП и ДПМ обычно оборудованы пристроенными к ним дисковыми тормозами. Если такие тормоза не предусматриваются или используются другие типы двигателей, на ведущем валу механизма устанавливают тормоз колодочного типа. Иногда с целью более плавного включения механизма в работу на ведущем валу располагают центробежную муфту.

Главный барабан может быть размещен на не вращающейся оси. В этом случае он приводится насаженным на него зубчатым колесом, зацепляющимся с шестерней выходного вала редуктора, а турачки устанавливаются на промежуточном валу. Нередко главный барабан размещают на грузовом валу, жестко связанном с выходным валом редуктора или выполненном с ним как одно целое. При этом турачки могут быть насажены как на грузовой, так и на промежуточный валы.

Предохранительное устройство, служащее для амортизации динамических нагрузок, воздействующих на буксирный канат, в большинстве случаев располагают на одном из валов редуктора, но встречаются конструкции (см. рис. 115 и 118 из [158]), где оно размещено на самом барабане.

В качестве канатов для простых буксирных лебедок обычно используют канаты по ГОСТ 3083-66 [467], а для автоматических лебедок рекомендуются канаты по ГОСТ 7668-69 [468] с маркировочной группой по временному сопротивлению для этих канатов 1400 МПа (140 кгс/мм^2) при диаметре от 37,5 до 56,6 мм, 1200 МПа (120 кгс/мм^2) при больших диаметрах и 1600 МПа (160 кгс/мм^2) при меньших диаметрах по сравнению с указанными.

Для того чтобы навить на главный барабан всю предусмотренную длину каната, его укладывают в несколько слоев, причем с целью предотвращения врезания наматываемого каната в зазор между витками предыдущего слоя число слоев каната рекомендуется принимать не более пяти, хотя имеются конструкции, где их число доводится до семи-восьми. Барабаны выполняют с гладкой цилиндрической поверхностью и высокими ребордами. Для правильной укладки каната предусматривают канатоукладчики. Лебедки оборудуют указателями длины вытравленного каната. С целью обеспечения свободного травления ненагруженного буксирного каната главный барабан лебедки должен быть отключаемым от привода. При этом должен быть обеспечен вывод каната из канатоукладчика. Для

установки каретки канатоукладчика в крайние положения его снабжают ручным приводом. Натянутый канат должен удерживаться на барабане при отключенном приводе посредством ленточного тормоза главного барабана.

Автоматическая лебедка должна обеспечивать принудительное выбирание каната, когда нагрузка на него окажется ниже заданного минимального значения, и травить его, когда нагрузка превысит заданную максимальную величину. При нагрузках, лежащих в пределах между минимальным и максимальным ее значениями, лебедка должна удерживать буксирный канат. Длина стравливаемой части каната задается в пределах 10–50 м. Однако в связи с тем, что внешние динамические воздействия на канат могут иметь периодичность, кратную частоте волнения моря, в таких лебедках возможно самопроизвольное стравливание каната с барабана до его коренной заделки.

В современных буксирных лебедках выбирание ненагруженного буксирного каната выполняется со скоростью 0,4–0,6 м/с. Скорость выбирания буксирного каната под нагрузкой при номинальном тяговом усилии на выполненных лебедках принята в пределах 0,1–0,3 м/с. Тяговые усилия обычно принимают в пределах 50–800 кН (5,0–80 тс).

Номинальные тяговые усилия на турачках при швартовке ранее назначали по характеристикам снабжения судов канатами согласно Правилам Регистра СССР. Малую скорость выбирания швартовного каната принимают не более 0,13 м/с, номинальную 0,2–0,3 м/с и наибольшую 0,4–0,7 м/с.

Ниже приведены характерные схемы двух буксирных лебедок, удовлетворяющие изложенным требованиям.

На рис. 5.13 показана схема простой буксирной лебедки при максимальном тяговом усилии на барабане 15 тс [158].

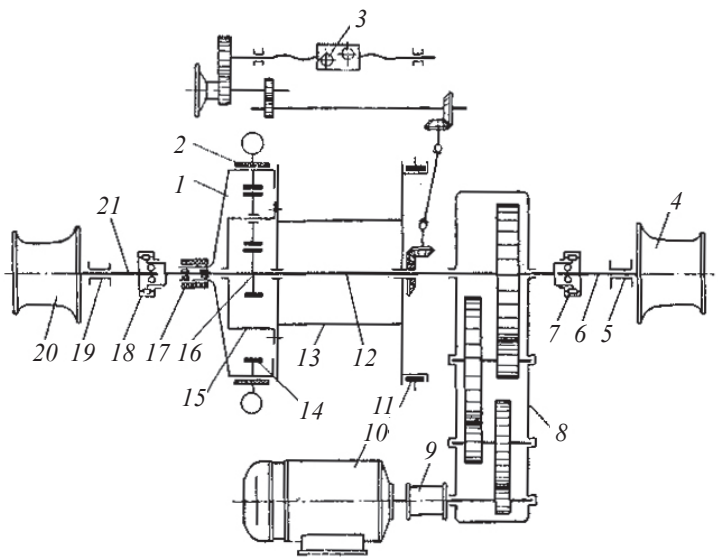


Рис. 5.13. Схема простой буксирной лебедки

Механизм состоит из электродвигателя *10*, связанного зубчатой муфтой *9* с трехступенчатым редуктором *8*, барабана *13* с встроенной внутрь него четвертой — планетарной ступенью передачи, канатоукладчика *3* и турачек *4* и *20*. Электродвигатель оборудован пристроенным дисковым тормозом. Барабан снабжен размещенным слева от него предохранительным (силоизмерительным) устройством, а справа ленточным тормозом. Солнечная шестерня *16* планетарной ступени насажена на грузовой вал *12*. Водило *15* болтами присоединено к барабану. Корончатое колесо *14* связано с ободом тормозного шкива *1* предохранительного устройства. Этот шкив при определенных условиях может вращаться в подшипнике скольжения *17*.

Основными режимами работы лебедки являются следующие.

1. Травление (выбирание) каната двигателями *5* и *12*.
2. Буксировка при постоянной длине вытравленного каната. Этот режим осуществляется при заторможенных барабанах *15* и *10* с помощью тормозов *2* и *8* соответственно и обесточенных электродвигателях.
3. Свободное травление каната. На этом режиме тормоза *2* и *8* освобождены, а ведущие шестерни редукторов и валы, связанные с электродвигателями, разобщены с помощью муфт *14* и *7*.

Особенности проектирования буксирных лебёдок.

При проектировании лебедок заданными считают номинальное тяговое усилие Q на барабане, скорость $\boldsymbol{v}$ выбирания буксирного каната на этом режиме, длину буксирного каната (канатоёмкость барабана), а также номинальное тяговое усилие $Q_{ш}$ на турачке и скорость $v_{ш}$ выбирания швартовного каната [158, с. 232].

Основные размеры элементов лебедок и их параметров определяют так же, как и у других лебедок. По заданному номинальному тяговому усилию рассчитывают разрывное усилие буксирного каната:

$$P_{разр} = Qn, \tag{5.20}$$

где n — коэффициент запаса, принимаемый по [158] в пределах 3...5.

С учетом указаний о рекомендуемом типе каната по этому усилию из табл. 7 подбирают диаметр $d_к$ каната.

Далее находят диаметр барабана $D = (16...20)d_к$.

При выбранном в первом приближении числе слоев k каната на барабане по (81) [158] определяют его длину l, где за $L_р$ принимают навиваемую на барабан длину буксирного каната.

Отношение длины барабана к его диаметру l/D обычно здесь принимают равным 1,4...1,6. Если при найденной длине l отношение l/D существенно отличается от рекомендуемого, следует повторить расчет, выбрав во втором приближении откорректированную величину k. По принятому числу слоёв каната вычисляют высоту реборд барабана.

Затем по формуле (15) [158] находят мощность двигателя, необходимую для обеспечения номинального режима работы лебедки. Из двигателей серии МАП переменного тока для буксирных лебедок применяют односкоростные электро-

двигатели с синхронной частотой вращения 16,7 и 25 об/с и часовым режимом работы (ПВ = 40 %).

При многослойной навивке каната на барабан крутящие моменты на первом и последнем слое могут различаться весьма существенно. Например, при шестислойной навивке момент на последнем слое примерно в 1,5 раза превышает момент на первом слое. Поэтому и мощность двигателя, требуемая для выбирания каната в заданном режиме, на разных слоях навивки будет различна [158, с. 233].

В буксирных лебедках принято считать, что при нормальной работе на барабан навито около половины длины каната, в связи с чем расчет скорости, как и момента, обычно выполняют по среднему витку. В соответствии с этим расчетная частота вращения барабана найдется из выражения:

$$n_б = \frac{v}{\pi D_{расч}}, \tag{5.21}$$

где $D_{расч} = D + (2k_{ср} - 1)\cdot d_к$ — расчетный диаметр барабана;

$k_{ср}$ — номер среднего витка.

В дальнейшем расчёт производится по стандартной схеме расчёта палубного механизма [158].

Далее по (112) [158] определяют разрывное усилие $P_{разр.ш}$ швартовного каната, где коэффициент запаса n принимают по данным § 42 [158, с. 233]. Выбрав в соответствии с рекомендациями § 48 тип каната, по этому усилию подбирают его диаметр, а по нему номер турачки (см. табл. 13 [158]). Далее по заданной скорости выбирания швартовного каната $v_т$ из (98) [158] находят частоту вращения $n_т$ турачки, а по (99) [158] — передаточное число $i_т$ привода турачки.

После этого найденное значение i привода барабана разбивают по ступеням передачи. При этом решают вопрос о валах, на которых следует разместить турачки, и при необходимости корректируют заданную скорость $v_т$. Затем по номинальной нагрузке на барабане для среднего слоя навивки каната определяют габаритные размеры передачи.

По выполнении этих расчетов составляют компоновочную схему механизма и проверяют передачи по предельной нагрузке, соответствующей пусковому моменту двигателя переменного тока, или стоянке под током двигателя постоянного тока. Если обозначить $M_{дв.пред.}$ — предельный момент электродвигателя, а $M_{дв.н.}$ — момент на валу при номинальной нагрузке, то напряжения в деталях передач для случая предельной нагрузки найдутся из выражения (113) [158, с. 233]:

$$\sigma_{пред} = \sigma_н \frac{M_{дв.пред}}{M_{дв.н}} \le [\sigma_{пред}], \tag{5.22}$$

где $\sigma_н$ — напряжения при номинальной нагрузке; $[\sigma_{пред}]$ — допускаемые напряжения при предельном нагружении, которые могут быть приняты равными $0{,}95\sigma_т$.

Толщину стенок барабана выбирают по номинальной нагрузке (см. формулу (83) [158]), как и для грузовых лебедок. На буксирных лебедках нагрузка на канат при заторможенном барабане может быть доведена до Q_{max}, равной $0{,}8P_{разр}$

или разрывному усилию $P_{разр}$ буксирного каната в зависимости от наличия или отсутствия соответственно на судне буксирного клюза и направляющих блоков.

Ленточный тормоз барабана проектируют по моменту, создаваемому на барабане усилием Q_{max}. Размеры тормозных лент здесь несколько меньше и удельные давления обычно не превышают 5 МПа (50 кгс/см^2). Момент на тормозном шкиве или коромысле силоизмерительного устройства для расчета его деталей определяют исходя из действия на буксирный канат 1,25–1,35 номинальной нагрузки. Диаметры грузового вала или оси барабана, а также валов турачек находят из условия действия номинальной нагрузки на канат. По этому же условию, как и для швартовных лебедок (§ 46) [158], проектируют канатоукладчик.

Кроме габаритных расчетов, должна быть произведена проверка прочности валов турачек при действии на швартовный канат его разрывного усилия $P_{разр}$, прочности грузового вала (оси барабана) и деталей канатоукладчика при не вращающемся ходовом винте, по усилию на буксирном канате, равному Q_{max}. При этих проверках найденные напряжения не должны превосходить величину $0{,}95\sigma_т$.

5.4.3. Траловые лебёдки. Общие сведения о промысловых устройствах для различных видов лова

В зависимости от применяемых орудий и оборудования судов промысловый лов подразделяется на траловый, кошельковый, дрифтерный и др. [158, с. 255].

Траловый лов заключается в буксировании за промысловым судном сетного мешка-трала при помощи двух стальных канатов — ваеров.

Рыбодобывающие суда — траулеры — оборудуются промысловыми устройствами, позволяющими производить спуск трала и маневрирование им во время траления (при разноглубинном лове), выбирание трала, освобождение его и подготовку к последующим постановкам. В зависимости от расположения промыслового устройства на судне и последовательности взаимодействия его элементов, определяемых промысловой схемой, суда бывают бортового или кормового траления.

На рыбопромысловых судах, работающих по такой схеме, в кормовой части расположен наклонный слип, по которому производится спуск и подъем трала. Схема кормового траления имеет следующие преимущества:

– спуск и подъем трала можно производить на ходу;

– упрощена система проводки ваеров;

– обеспечивается подъем всего трала на рабочую палубу.

Основным механизмом любой рыбопромысловой схемы являются траловые лебедки [158, с. 257]. Что касается другого оборудования (сетевыборочные машины, сететрясные машины и т. д.), то оно относится к специальному промысловому оборудованию и в данном случае не рассматривается.

Оборудование промыслового тралового комплекса можно разделить на три основные группы: траловые лебедки, вспомогательные промысловые машины и механизмы, промысловые устройства и приспособления [189, с. 24].

В промышленном рыболовстве применяются три основных типа лебёдок [189, с. 19]:

1. Лебёдки, предназначенные для выборки, укладки, выметки канатов и сетных жгутов орудий лова.

2. Промыслово-грузовые лебёдки для работы как с орудиями лова, так и для грузовых операций.

3. Лебёдки, входящие в состав других более сложных механизмов — кранов, подъёмников и других грузоподъёмных механизмов.

К первой группе относятся многооперационные, комбинированные и однооперационные лебедки.

Однооперационные лебедки выполняют, как правило, одну операцию и имеют соответствующее название: ваерные, кабельные, вытяжные, кабельно-сетные, кабельно-вытяжные.

Вторую группу составляют грузовые лебедки, лебедки кабеля сетного зонда, шпили, грузовые и промысловые краны, стрелы и кранбалки, вьюшки для канатов, спускные лебедки для сброса мешка в воду и др. механизмы.

В третью группу входят: рабочая промысловая палуба, слип, траловые дуги и подвесные блоки, ролики, ролы, тали и др.

Многооперационная лебедка позволяет выполнять все операции тралового лова. Она имеет один привод на несколько барабанов.

Основные требования, предъявляемые к многооперационной лебедке [189]:

– траловая лебедка должна иметь минимум 2 ваерных барабана, свободно сидящих на грузовом валу. Усовершенствованные конструкции лебёдок могут иметь также кабельные, кабельно-сетные, вытяжные и грузовые барабаны;

– барабаны соединяются с валами с помощью сцепных (разъёмных) муфт и вращаются с валами при выборке ваеров, а при травлении свободно вращаются на валах, скорость травления регулируется тормозами;

– должна обеспечиваться возможность включения барабанов под нагрузкой (для экстренного подъёма трала), для этого привод должен иметь пусковой момент, превышающий номинальный в 1,5–2 раза при снижении скорости;

– канатовместимость каждого ваерного барабана должна рассчитываться для укладки двойной длины ваеров (это необходимо при промере длины ваера, ремонте барабана или лебёдки, при этом ваер с одного барабана через систему роликов перематывается на другой);

– ваерные барабаны должны иметь тормоза, обеспечивающие полное торможение в процессе траления и частичное при травлении ваеров;

– для снижения износа каната и максимальной канатовместимости укладка ваера должна проводиться автоматическим канатоукладчиком;

– современные лебедки обеспечиваются автоматическим растормаживающим устройством для предотвращения превышения нагрузок на ваера и барабаны при зацепах трала. Устройство не должно срабатывать при кратковременном увеличении нагрузок от волнения. Предусматривается автоматическое прекращение травления ваеров, когда на барабанах остается один слой навивки;

– лебедка должна управляться с местного и дистанционного пульта (обычно из рулевой рубки);

– лебедка должна иметь минимум 2 фрикционных или навивных барабанов для промысловых и грузовых операций. Вспомогательные навивные барабаны оборудуются муфтами включения и тормозами.

Одним из важнейших требований к траловым лебедкам является их надежность, так как выход из строя на промысле одной из лебедок парализует работу всего производственного комплекса траулера. Необходимость многократного включения, отключения, затормаживания и растормаживания барабанов во время промыслового цикла значительно снижает надежность многооперационной траловой лебедки.

Более высокую надежность имеют однооперационные лебедки, работающие только с одним канатом (ваера, кабели, вытяжной конец и т.д.). Наиболее важной является ваерная лебедка, предназначенная для выборки, травления, удержания ваеров при тралении.

Однооперационная ваерная лебедка более проста по конструкции и имеет один барабан, привод, редуктор, раму с опорными элементами, укладчик, тормозное устройство и систему автоматического контроля параметров и управления. В промысловой схеме в кормовой части судна устанавливаются две однооперационные ваерные лебедки правого и левого исполнения.

Наиболее удобно выполнять промысловые операции ваерными лебёдками, установленными в кормовой части у ваерных блоков. Многооперационная лебёдка устанавливается у надстройки в конце промысловой палубы. При этом создаются неудобства и повышается опасность для работающих от ваеров, проходящих под нагрузкой через всю промысловую палубу [189, с. 25].

Комбинированные лебедки имеют в своем составе барабаны для работы на двух или нескольких видах лова, например, на траловом и кошельковом (траловосейнерная лебедка).

Кабельные лебедки предназначены для выборки кабелей и голых концов тралов. Такой тип лебёдок для работы с крупногабаритными разноглубинными тралами является устаревшим механизмом по сравнению с кабельно-сетным барабаном. Кабельные лебёдки применяются для донных тралов, так как невозможно намотать на барабан трал с грунтропом. Конструктивно лебёдки выполняются с одним и двумя консольно-расположенными барабанами.

Кабельно-вытяжные лебедки применяются для выборки кабелей, голых концов трала и вытяжных концов при подъеме мешка с уловом по слипу. Содержат 2 кабельных и один вытяжной барабан.

Вытяжные (гиневые) лебедки используются для подъема мешка по слипу и вспомогательных операций. Имеют один навивной барабан, установленный чаще консольно.

Кабельные, кабельно-вытяжные и вытяжные (гиневые) лебедки устанавливаются у надстройки судна в начале промысловой палубы [189, с. 27].

Промыслово-грузовые лебедки применяются для вспомогательных и грузовых операций. Устанавливаются в кормовой части судна вблизи порталов, грузовых колонн или в районе грузовых стрел.

В зависимости от назначения используется большое разнообразие конструкций лебёдок. Но большинство лебёдок состоит из однотипных элементов: рабочего органа — барабана, привода, редуктора, тормозных устройств, элементов управления (укладчиков, муфт и т.д.) и приборов автоматического управления.

В лебёдках применяются навивные барабаны с организованной (с укладчиком) и неорганизованной укладкой. Организованная укладка используется в барабанах с большой канатовместимостью, неорганизованная при небольших длинах канатов. Фрикционные барабаны (турачки) устанавливаются как дополнительные элементы для выполнения вспомогательных и грузовых операций [189, с. 20].

Редукторы современных лебёдок разделяются на цилиндрические и коническо-цилиндрические. Червячные и червячно-цилиндрические в современных лебёдках не используются из-за малого КПД и повышенного износа червяка. Для обеспечения высокой надёжности редукторы выполняются односкоростными, а регулирование скорости проводится частотой вращения приводного двигателя. Привод лебёдок в зависимости от источника энергии бывает электрическим, гидравлическим и от ДВС.

Конструктивно лебёдки могут выполняться с двухопорным расположением барабана и консольным (рис. 5.14) [189].

Двухопорные конструкции (рис. 5.14, *а*) применяют в лебёдках с большой канатовместимостью, консольное расположение барабанов (рис. 5.14, *б*) — в лебёдках с малой канатовместимостью. Двухопорные конструкции характеризуются более равномерной нагрузкой на опоры, но такие лебёдки имеют большие габариты. У лебёдок с консольными барабанами меньшие габариты, что является серьёзным преимуществом при выборе оборудования при ограниченных размерах промысловой палубы, но основной недостаток — повышена изгибающая нагрузка на вал барабана и неравномерно нагружены опоры [189, с. 21–23].

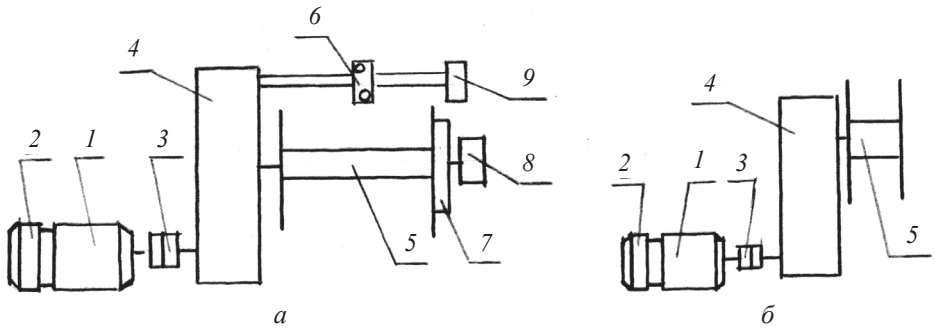


Рис. 5.14. Конструктивные схемы промысловых лебёдок:

1 — привод; *2* — тормоз приставной; *3* — муфта; *4* — редуктор; *5* — барабан; *6* — канатоукладчик; *7* — тормоз ленточный; *8* — опора барабана; *9* — опора укладчика

Промысловые лебёдки являются тяжелонагруженными механизмами, поэтому барабаны устанавливаются на опорах с шариковыми двухрядными или роликовыми подшипниками. Канатоукладчики применяются для равномерной укладки каната на барабан, при этом увеличивается канатовместимость, улучшаются условия эксплуатации и снижается износ каната. Наибольшее примененение в промысловых машинах находят автоматические винтовые канатоукладчики, передвигающие каретку винтом с перекрёстной нарезкой (левой и правой на одном винте).

На навивные барабаны промысловых лебёдок (кроме ваерных) устанавливают вытяжные концы из стальных канатов, которые крепятся к барабану двумя или тремя прижимными планками. Вытяжные концы присоединяют с помощью гаков или скоб к соответствующему элементу траловой системы для выборки. Длина вытяжного конца определяется расстоянием от лебёдки до места крепления к тралу, обычно это район слиповой канавки.

Основными параметрами для всех промысловых машин являются тяговое усилие и скорость тяги. Для траловых и ваерных лебедок рекомендован параметрический ряд с суммарным тяговым усилием на 2 барабана на среднем слое навивки: 16, 25, 40, 63, 100, 125, 160, 200 кН. Тяговое усилие вспомогательных барабанов принимают 80% от усилия на ваерных барабанах [189, с. 19–22].

Рекомендуемая скорость выборки ваеров для малых траулеров 1,2–1,5 м/с, для средних — 2,0–2,35 м/с и для больших и супертраулеров — 2,15–2,5 м/с. Скорость травления ваеров принимают обычно в 1,6–2,0 раза больше скорости выбирания.

Для ваерных лебедок важным параметром является канатовместимость. Для малых траулеров она рекомендуется до 750 м, средних — 1500–2000 м, больших — 2500–3500 м, для супертраулеров — 3500–4500 м.

Рекомендуемая скорость выборки кабелей 0,8–1,2 м/с, а сетной части — 0,25–1,5 м/с. Канатовместимость для кабельных барабанов составляет 200–300 м, вытяжного — 60–100 м. Скорость выборки вытяжных концов при подъеме мешка с уловом — 0,25–0,5 м/с.

На рис. 5.15 [382] приведено фото траловой лебёдки ЛЭТрС 3 на МРПСРТ «Вирбалис» типа «Гируляй» (рис. 5.16).

Суда этого типа предназначались для лова рыбы донным близнецовым и разноглубинными тралами, а также выпуска мороженной продукции. ТЭ: водоизмещение — 560 т; 35,7 × 8,8 × 4,9 м; 1 ДД мощн. 588 кВт; скорость хода полн. — 10,7 уз; экипаж — 17 чел.; автономность — 20 сут.

При изучении поведения рыб в зоне тралящих орудий лова приходится учитывать следующее [121, с. 10]: скорость рыб достигает 2,5–3,0 м/с и более; буксировка трала ведется на сравнительно больших скоростях (от 2,0 до 3,0 м/с и более). Так, траулеры должны развивать тягу 25–40 тс и скорость траления 4,5–5,0 уз. [162, с. 318]. В связи с обнаружением больших скоплений рыбы на глубинах 2000 м предстоит разработать принципиально новые методы и создать орудия лова с искусственной концентрацией и селективным выловом рыбы. Для освоения глубоководного рыбного промысла потребуется переоборудование промысловых судов и расширение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

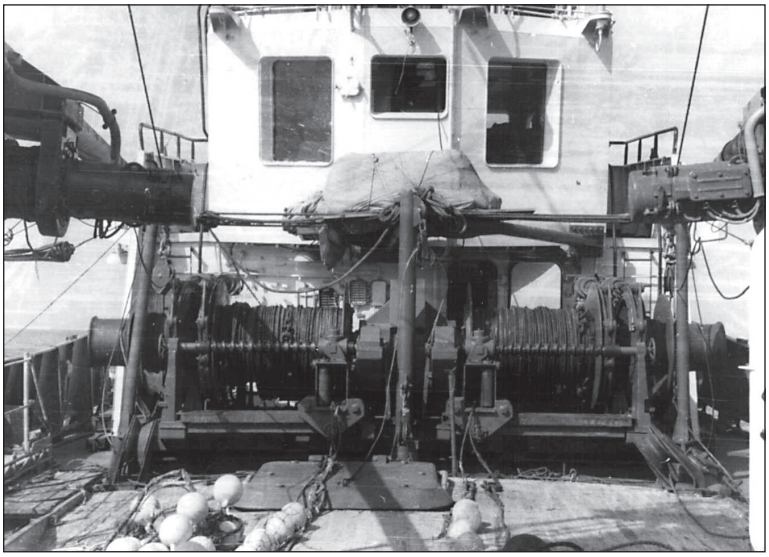


Рис. 5.15. Траловая лебёдка ЛЭТрС 3 на МРПСРТ «Вирбалис» типа «Гируляй» [382]



Рис. 5.16. МРТК «Вирбалис»

5.4.3.1. Ваерная лебедка. Расчет нагрузок на промысловые механизмы траулеров

Основными проектными характеристиками являются: тяговое усилие, скорость выборки ваера, длина и диаметр ваерного каната [189, с. 28–30].

Тяговые характеристики машин тралового лова связаны с размерами применяемых орудий лова, а орудия лова подбираются в соответствии с тяговыми характеристиками траулера.

Процесс подъема и спуска трала в общем виде является нестационарным, особенно при разгонах и торможении. При установившемся движении судна и ваера процесс движения траловой системы можно считать стационарными. При расчетах основных параметров лебедок необходимо выполнение следующих условий:

1. Скорость трала относительно воды при выборке не должна быть меньше скорости траления, для предотвращения выхода рыбы из трала.

2. Оптимальная скорость выборки ваеров — при которой себестоимость добываемой продукции минимальна.

3. Канатоемкость барабанов определяется режимом глубоководного траления. Для судов СРТМ — 2000–2200 м до глубин 900 м; БМРТ — 3000 м до глубин 1000–1200 м; БАТ — 3500–4000 м до глубин 1500–2000 м.

4. Скорость судна при подъеме трала должна быть наименьшей, но не меньше скорости устойчивой управляемости на курсе. Обычно $V_C > [V_C]_{уст} = 0{,}5–1{,}25$ м/с или 1–2,5 узла.

5. При травлении ваеров (спуске трала) скорость трала относительно воды не должна быть меньше скорости устойчивого движения траловой системы (для предотвращения заверта трала). Обычно $V_{ТР} > 1{,}25$ м/с или 2,5 узла.

В основу расчета должна быть положена паспортная диаграмма тяговых характеристик траулера.

Мощность, передаваемая гребному винту для буксировки:

$$N_Б = N_e - N_{ОТБ}, \tag{5.23}$$

где N_e — мощность главного двигателя, кВт;

$N_{ОТБ}$ — мощность валогенератора, кВт.

Расчетная мощность траления с учетом необходимого резерва мощности для маневров судна

$$N_{ТР} = K_Р \cdot N_Б, \tag{5.24}$$

где $K_Р = 0{,}9–0{,}95$ — коэффициент использования мощности главного двигателя.

Расчет нагрузки на ваерную лебедку при подъеме-спуске трала проводим с использованием физической модели судно-трал. Судно и трал представляем в виде материальных точек С и О, соединенных между собой гибкой тяжелой нерастяжимой нитью (рис. 5.17) [189, с. 31]. На трал действуют силы веса — $G_Т$, гидродинамическое сопротивление $R_Т$. На судно действует тяга гребного винта P_e. Ваер находится под действием распределённой силы веса $q_в$ и сопротивления $R_в$. Натяжение ваеров у траловых досок $T_О$, на ваерных блоках T и на лебедке $T_Л$. Скорость

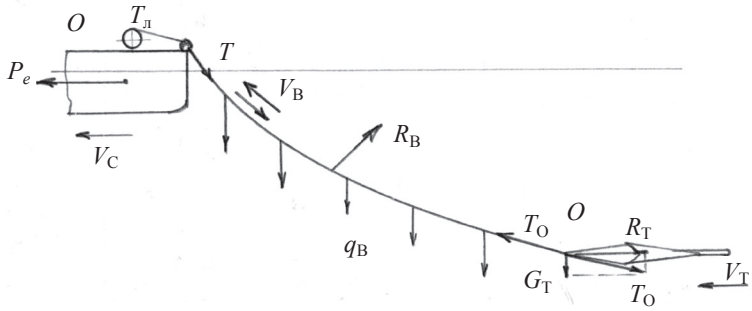


Рис. 5.17. Физическая модель «судно-трал» [189, с. 31]

трала при подъеме и спуске V_T является геометрической суммой скорости судна V_C и скорости ваера V_B.

Скорость ваера при выборке трала определяется по формуле [189]:

$$V_B^{выб} = \frac{V_T}{\sqrt{1+\left(\frac{G_T V_T}{R_T V_C}\right)^2}} \left[\sqrt{1+\left(\frac{G_T}{R_T}\right)^2\left(\frac{V^2{}_T}{V_C{}^2}-1\right)}-\left(\frac{Vc}{Vt}\right)\right]. \quad (5.25)$$

Скорость ваера при спуске трала

$$V_B^{сп} = \frac{V_T}{\sqrt{1+\left(\frac{G_T V_T}{R_T V_C}\right)^2}} \left[\frac{V_C}{V_T}-\sqrt{1+\left(\frac{G_T}{R_T}\right)^2\left(\frac{V_T{}^2}{V_C{}^2}-1\right)}\right]. \quad (5.26)$$

В формуле (2.25) параметры V_T, V_C, R_T — значения для режима подъёма трала, в формуле (2.26) для режима спуска трала.

Натяжение ваеров у траловой доски:

$$T_0 = \frac{G_T{}^2 V_T + R_T\sqrt{G_T{}^2 V_T{}^2 + V_C{}^2\left(R_T{}^2 - G_T{}^2\right)}}{\sqrt{G_T{}^2 V_T{}^2 + R_T{}^2 V_C{}^2}}. \quad (5.27)$$

Натяжение ваеров у ваерных блоков

$$T = T_0 K_l, \quad (5.28)$$

где K_l =1,05–1,1 — коэффициент, учитывающий увеличение натяжения T по отношению к T_0 от действия сил сопротивления ваеров и их веса.

Натяжение ваеров на барабане ваерной лебёдки [189]

$$T_л = T \cdot K_д \cdot K_б \cdot K_у, \quad (5.29)$$

где $K_б$ = 1,03–1,05 — коэффициент, учитывающий увеличение натяжения ваеров от сопротивления на ваерных блоках;

$K_д$ = 1,1–1,25 — коэффициент динамической нагрузки от волнения;

$K_у$ = 1–1,2 — коэффициент увеличения нагрузки на ваера от улова в мешке.

Мощность привода ваерной лебёдки

$$N = \frac{T \cdot V}{\eta}, \tag{5.30}$$

где η — КПД привода лебдки.

Для кабельных и кабельно-сетных барабанов основными характеристиками являются тяговое усилие, скорость тяги и вместимость рабочего барабана. При выборке кабельной оснастки трал складывается, движется в кильватерной струе, и поэтому нет математических зависимостей для определения сопротивления. В этом случае можно использовать эмпирическую зависимость [189, с. 33]:

$$T_к = K_д \cdot A_к \cdot R_{тр}, \tag{5.31}$$

где $R_{тр}$ — агрегатное сопротивление оснащенного трала в режиме траления со скоростью V_T(паспортная характеристика), кН. Для проектируемого траулера можно принять как располагаемую тягу;

$K_Д$ = 1,1–1,25 — коэффициент динамичности нагрузки от волнения моря и качки судна;

$A_к$ — коэффициент изменения нагрузки при выборке кабельной оснастки. Он имеет максимальное значение в начале выборки A_{max} = 0,6 и минимальное в конце A_{min} = 0,22. При выборке канатно-сетной части A = 0,11.

Скорость трала относительно воды при выборке кабелей не должна быть меньше скорости движения трала в режиме траления для предотвращения выхода рыбы:

$$V_Т = V_С + V_К. \tag{5.32}$$

Рекомендуемое значение скорости выборки кабелей $V_К$ = 0,6–1,2 м/с, сетной части $V_С$ = 0,25–0,5 м/с.

В ориентировочных расчётах нагрузку на барабанах кабельных лебёдок и кабельных втулках кабельно-сетных барабанов можно принять

$$T_к \geq 0{,}45 T_0 K_д. \tag{5.33}$$

Тяговое усилие при выборке канатно-сетной части

$$T_{кст} = 0{,}11 \cdot T_0 \cdot K_д. \tag{5.34}$$

Основные принципы расчета лебедок.

Расчет промысловых лебедок выполняется с учетом специфики работы каждого вида механизма [189, с. 33–35]. Основные этапы следующие:

1. Формирование массива исходных данных для обоснования основных проектных характеристик лебедки. Исходными данными являются: назначение лебедки, тип судна, характеристики орудий лова или грузов и т.д.

2. Обоснование основных проектных характеристик лебедки. К ним относятся: максимальное и номинальное тяговое усилие на каждом барабане, максимальная, номинальная и минимальная скорость выборки и травления каната, канатовместимость каждого барабана, мощность привода лебедки и т.д. Тяговые усилия рассчитываются в зависимости от размеров и сопротивления орудий лова. Необходи-

мый диапазон скоростей принимают в соответствии с техникой и тактикой работы с орудием лова. Канатовместимость ваерных лебедок определяется максимальной глубиной опускания трала, кабельных барабанов, максимальной длиной кабельной оснастки тралов и т.д. Обоснование основных параметров является наиболее ответственным этапом проектирования, ошибки, допущенные на этом этапе, трудно поддаются исправлению и приводят к большим экономическим потерям.

3. Расчет гибких тяговых органов (канатов), геометрических и прочностных размеров рабочих органов (барабанов). Тип и диаметр канатов выбирают из ГОСТа с учетом рекомендуемых коэффициентов запаса прочности.

4. Построение кинематической схемы механизма.

5. Расчет и подбор привода (двигателя, редуктора, передач), расчет валов, подшипников, муфт, тормозов, укладчиков и т.д.

6. Построение схемы энергопитания, управления приводом, тормозами и муфтами лебедки.

7. Сравнение показателей технического уровня проектируемой лебедки с конструктивным прототипом.

8. Проведение мероприятий в случае необходимости по повышению технического уровня проектируемой лебедки.

9. Разработка ТЗ на конструкцию лебедки.

5.4.3.2. Особенности проектирования траловых лебёдок

[158, с. 260-261]

Устройство и условия работы траловых лебедок имеют ряд конструктивных особенностей, на которых мы остановимся более подробно.

К основным параметрам траловой лебедки относятся: номинальное тяговое усилие, скорость выбирания ваера и рабочая длина ваера.

Диаметр ваера выбирают исходя из разрывного усилия каната в целом, которое определяется выражением [158, с. 260]:

$$P_{\text{разр}} \geq Qnn_{\text{д}}, \tag{5.35}$$

где Q — номинальное тяговое усилие лебедки, Н (кгс); n — коэффициент запаса прочности канатов для орудий лова, n = 2,5...3,5; $n_{\text{д}}$ — коэффициент динамичности, учитывающий пульсирующий характер нагрузки на ваере при выборке, $n_{\text{д}}$ = 1,6...2,0.

Отличительная особенность траловых лебедок — большая канатоёмкость ваерных барабанов. Диаметр ваерного барабана определяют из соотношения $e = D_{\text{б}}/d_{\text{в}}$, которое рекомендуется принимать не менее 20. Шаг навивки ваера $t = d_{\text{в}} \cdot 1{,}06+(0{,}2...0{,}4)$, где 1,06 — коэффициент увеличения диаметра ваера; 0,2...0,4 — прибавка на неплотность навивки. Длина барабана

$$L_{\text{б}} = (40...60)t. \tag{5.36}$$

Обычно отношение $z = L_{\text{б}}/D_{\text{б}}$ = 2,7...3,2.

Число витков (шлагов) по длине барабана в одном слое $x = L_{\text{б}}/t$.

При заданной канатоемкости число слоев k на барабане с учетом эллиптичности шлагов за счет многослойной навивки равно (ф-ла 119) [158, с. 260]:

$$k = -0{,}54z + \sqrt{0{,}3z^2 + \frac{L_в}{2{,}92 d_в x}}. \qquad (5.37)$$

Число слоев в зависимости от полной длины ваера может достигать 16...20 [158, с. 260].

Мощность привода траловой лебедки определяют по формуле (15) [158, с. 261]. По полученной мощности выбирают требуемый электро-, гидродвигатель или гидромотор. Табличная мощность гидромотора должна приниматься с учетом располагаемого перепада давления в гидросистеме, при этом передаточное число редуктора лебедки, исходя из номинальной скорости выбранного гидромотора и скорости выбирания ваера, определяется выражением [158, с. 261]:

$$i = \frac{n_г}{n_б}, \qquad (5.38)$$

где $n_г$ — частота вращения гидромотора, об/с; $n_б$ — частота вращения барабана при средней скорости выбирания ваера, $n_б = v_в/(nD_{ср})$, об/с ($D_{ср}$ — средний диаметр навивки ваера на барабане, м).

Выбранный по табл. 5 и 6 [158, с. 261] гидромотор должен быть проверен по моменту, с учетом фактического перепада давления, на обеспечение всех режимов работы $M_г \geq (Q_в \cdot D)/(2i_л \cdot \eta_л)$ лебедки, где $M_г$ — момент гидромотора при фактическом перепаде давления, Н-м; $Q_В$ — номинальное тяговое усилие на первом слое навивки барабана, Н; D — диаметр навивки первого слоя, м [158, с. 261]. Выбор приводного электродвигателя аналогичен выбору двигателя для грузовых лебедок.

5.4.4. Спуско-подъёмные устройства и специальные лебёдки для спуска и буксировки ПА

Важнейшими составными частями комплексов технических средств изучения и освоения Мирового океана служат различного рода контейнеры с научной аппаратурой, наблюдательные камеры, водолазные колокола, глубоководное дистанционно управляемое оборудование для обследования дна и добычи минеральных ресурсов [172, с. 187].

Значительная часть таких средств — необитаемые подводные аппараты, которые можно подразделить на три группы:

1) аппараты, опускаемые в толщу воды на кабель-тросе;

2) аппараты, перемещающиеся по морскому дну;

3) аппараты, буксируемые за обеспечивающим судном.

Аппараты первой и второй групп используют преимущественно для решения промышленных задач. Аппараты третьей группы предназначены в основном для научно-исследовательских работ.

Эффективное использование необитаемых аппаратов под водой возможно лишь при наличии на обеспечивающем судне специальных устройств для выноса их за борт и спуска под воду.

На конструкцию рассматриваемых устройств определяющее влияние оказывают следующие факторы: наличие кабель-тросовой связи опускаемого неавтономного объекта с судном-носителем; размеры и форма самого объекта; необходимость обеспечения работы при неподвижном или движущемся судне-носителе; отношение задач, выполняемых опускаемым объектом, к задачам самого судна-носителя (рис. 5.18) [16].

Для конструкций устройств, обслуживающих неавтономные опускаемые объекты, очень важна глубина их погружения, которая колеблется от десятков до нескольких тысяч метров. Значительные глубины погружения вызывают необходимость применения специальных кабель-тросов большой длины, что затрудняет проектирование лебедок и других обслуживающих механизмов. С другой стороны, использование кабель-тросов большой длины предполагает учет волновых процессов деформирования канатов при динамических расчетах устройств.

5.4.4.1. Конструктивные особенности устройств, предназначенных для буксируемых подводных аппаратов

В конце шестидесятых годов XX ст. в ВМФ всех ведущих стран начинают внедряться новые гидроакустические комплексы с буксируемыми антеннами. На отечественных надводных военных кораблях появились комплексы «Вега», «Платина», устройства спуска и подъема которых разрабатывали сами проектировщики кораблей [461, с. 93]. Здесь же приводятся основные технические трудности, с которыми столкнулись проектировщики таких устройств. Буксируемые системы представляли собой сложные конструкции, включающие в себя такие разнородные элементы, как заглубители (тела-носители обтекаемой формы, в которых размещаются гидроакустические антенны), сотни метров кабель-тросов, состоящих из токоведущих жил и грузонесущей оплетки из канатной проволоки. В ряде случаев эти конструкции бывают еще сложнее: с несколькими заглубителями на разных уровнях, с разнородными кабель-тросами и т.п.

Особенности буксируемых систем оказывают существенное влияние на конструкцию элементов спуско-подъемных устройств. Так, например, необходимо обеспечить захват буксируемого носителя таким образом, чтобы не повредить недостаточно прочные звукопроницаемые его оболочки, исключить многократные перегибы кабель-буксира малого радиуса, расположить кабель-буксир в один слой при намотке его на барабан лебедки таким образом, чтобы не разрушить резиновые обтекатели (навешиваемые на кабель-буксир для снижения сопротивления воды), передать сигнал с подвижного барабана на неподвижный аппаратурный комплекс и многое другое. К этим техническим проблемам, связанным с особенностями буксируемых систем, добавляются и габаритные ограничения по расположению в закрытых помещениях в корме корабля.

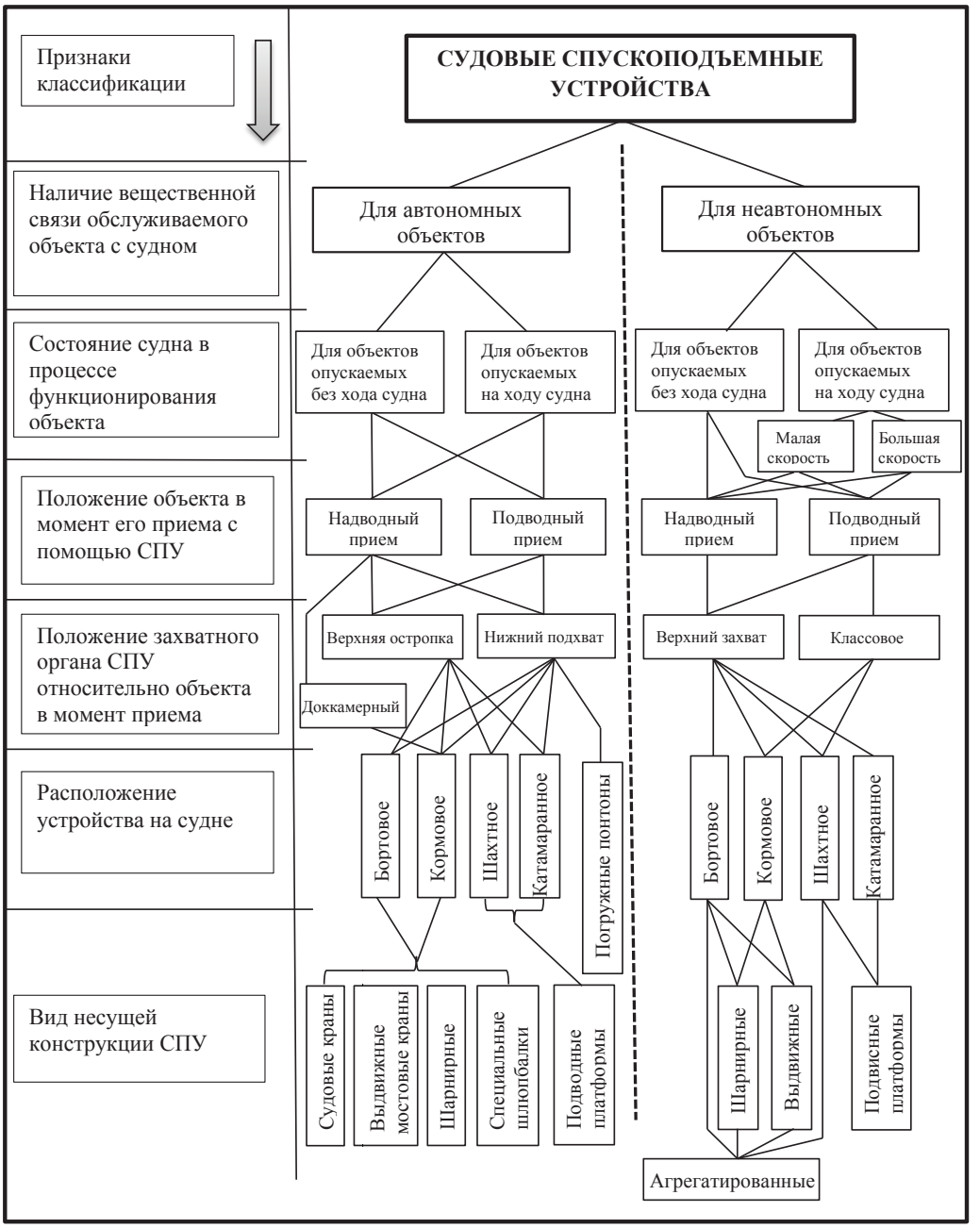


Рис. 5.18. Классификация судовых спуско-подъемных устройств [16]

В первоначальный период внедрения буксируемых гидроакустических комплексов спуско-подъемные устройства устанавливались в корме на верхней палубе (например, на эсминце США «L.W.Thompson», фрегатах Канады «Ottawa» и др.), усложняя использование оружия и обслуживание гидроакустических антенн. Однако, уже вскоре буксируемые системы стали располагаться в закрытых кормовых помещениях (фрегаты США типа «Knox»).

На рис. 5.19 приведен пример буксируемой ГАС ЭМ ВМС Франции «La Galissonniere» [469]. Размещаемая в обтекателе антенна ГАС содержит 192 преобразователя, которые объединены в 24 группы, по восемь преобразователей в каждой. Диаметр антенны 1 м, высота 1,2 м. Дальность обнаружения в зависимости от гидрологических условий колеблется от 5 до 20 км. Заглубление при буксировке — 50–200 м. Скорость буксировки от 4 до 24 уз. [469]. Размеры обтекателя ГАС: длина — 5,5 м, ширина — 1,7 м, высота — 3,7 м. Масса ГАС в воздухе 7,7 т, в воде — 1,5 т. Буксировочный кабель-трос с двойной стальной оплеткой содержит 48 пар проводников и рассчитан на максимальное разрывное усилие 60 тс.

На рис. 5.20 приведена буксируемая гидроакустическая станция (ГАС) пассивного типа CAPTAS-4 (The Combined Active and Passive Towed Array Sonar) [470, с. 75], разработанная французской компанией «Талес андервотер системз».

Она предназначена для обнаружения подводных лодок, надводных кораблей противника и выдачи целеуказаний по ним. Буксируемая часть ГАС включает в свой состав погружаемое тело (генератор инфразвуковых сигналов) и гибкую протяженную антенну (ГПА). Основные характеристики ГАС: диапазон рабочих частот в активном режиме 0,95–2,1 кГц (виды модуляции сигнала: SM, CW или комбинированный, длительность импульса 1–16 с), в пассивном — 0,1–2 кГц, время развертывания в боевое положение 20 мин, максимальная скорость бук-

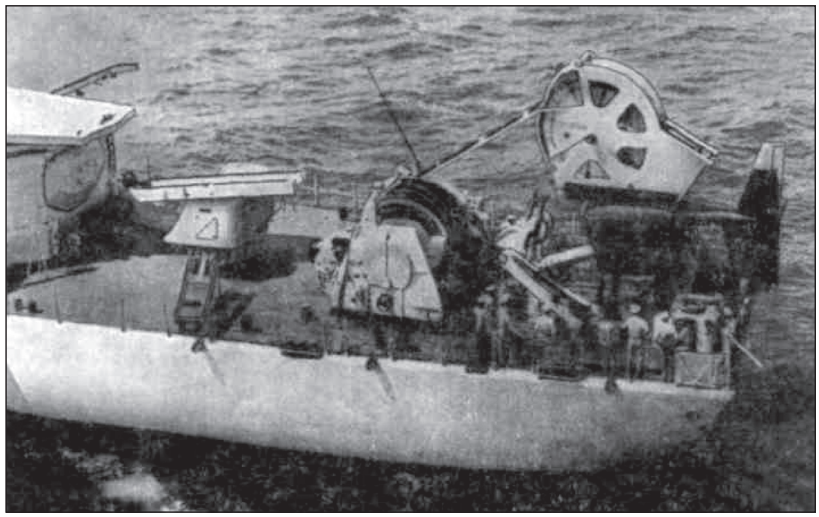


Рис. 5.19. Подъем на борт ЭМ ВМС Франции «La Galissonniere» водоизмещением 2750 т буксируемой ГАС переменной глубины DUBV 43 [469]

сировки 30 уз. Рабочая глубина буксировки погружаемого тела 250 м, его размеры: длина 2 м, ширина 1 м, высота 1,2 м, масса 1 250 кг (с кабель-тросом — 2490 кг).Длина ГПА 90 м (без кабель-троса), диаметр 85 мм. Для буксировки ГПА могут использоваться кабель-тросы длиной 264 м или 500 м. ГАС CAPTAS-4 входит в состав радиоэлектронного вооружения фрегатов проекта 23 ВМС Великобритании под обозначением «Тип-4249», а также выбрана для установки на фрегаты, строящиеся по программе FREMM для ВМС Италии и Франции.



Рис. 5.20. Буксируемая гидроакустическая станция (ГАС) пассивного типа CAPTAS-4 (The Combined Active and Passive Towed Array Sonar) [470, с. 75]

Устройства для спуска-подъема подводных неавтономных аппаратов можно классифицировать (рис. 5.21) по следующим признакам [172, с. 188]: выполнению операции спуска-подъема и эксплуатации аппаратов с движущегося судна или с судна без хода; расположению устройства в рабочем состоянии на судне; разновидности выносной металлоконструкции. Выносные металлоконструкции чаще других элементов подвержены изменениям при разработке новых конструктивных схем.

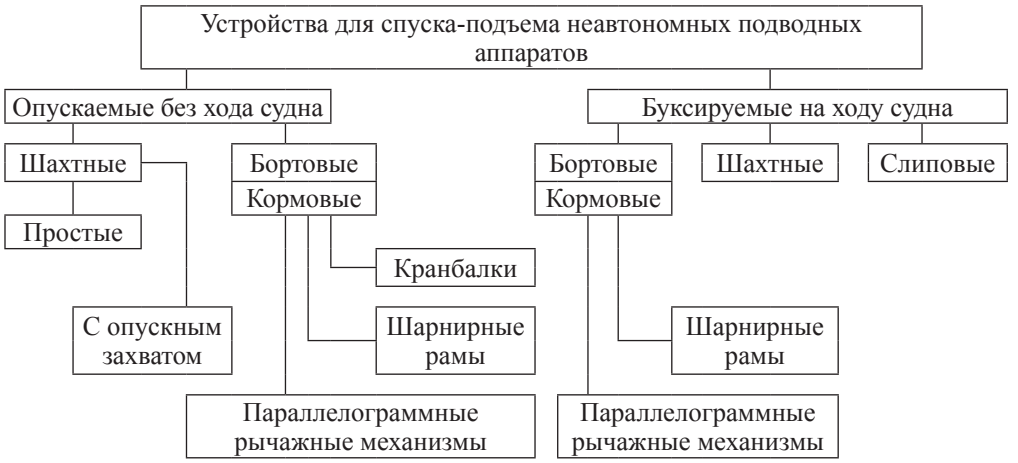


Рис. 5.21. Классификация устройств для спуска и подъема неавтономных подводных технических средств

Для конструкций устройств, обслуживающих неавтономные опускаемые объекты, очень важна глубина их погружения, которая колеблется от десятков до нескольких тысяч метров. Значительные глубины погружения вызывают необходимость применения специальных кабель-тросов большой длины, что затрудняет проектирование лебедок и других обслуживающих механизмов. С другой стороны, использование кабель-тросов большой длины предполагает учет волновых процессов деформирования канатов при динамических расчетах устройств. Для обслуживания плавсредств используют научно-исследовательские, рыбопромысловые, буровые суда, полупогружные буровые установки, специальные суда для добычи минеральных ресурсов со дна океана.

5.4.4.2. Конструктивные особенности устройств для опускания аппаратов под воду

Самое простое устройство такого типа — поворотная кран-балка, с ее помощью за борт выносят и опускают различные относительно малые океанографические приборы. Имеются также сложные конструкции кранбалок с механическим приводом поворота и лебедкой на кранбалке [172, с. 189].

Высокая напряженность работы кабель-буксиров, сложность их конструкции требуют особого внимания к обеспечению их необходимой долговечности.

Одно из наиболее эффективных средств в этом отношении — увеличение радиуса перегиба кабель-буксира. Поэтому диаметры шкивов выбирают равными 40–50 диаметрам стального троса, что приводит к увеличению габаритов и масс узлов устройства и лебедки, большим площадям и объемам помещений на судне, необходимым для размещения комплекса СПУ – аппарат.

На рис. 5.22 приведено фото СКР пр. 1135 [462].

Лебёдка ЛГС–13, изготовленная для головного корабля на Хабаровском заводе им. А.М. Горького, прошла стендовые испытания и была принята заказчиком (рис. 5.23) [462].

На данном проекте устанавливались устройства подобного типа (рис. 5.24–5.27) [462].



Рис. 5.22. СКР «Ладный» у входа в Северную бухту. 2007 г. [462]

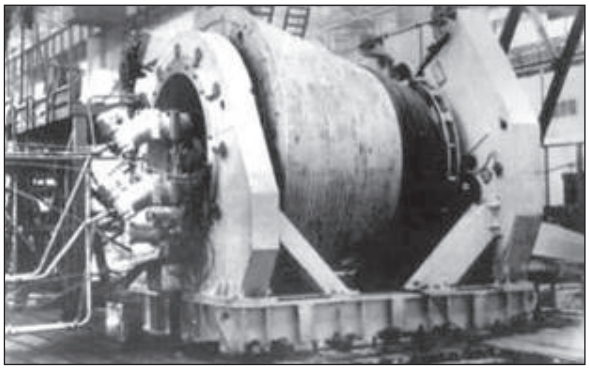


Рис. 5.23. Лебедка ЛГС–13 с коническим барабаном для ПОУКБ-1 заказа №С–151 в цеху Хабаровского завода им. А.М. Горького [462]

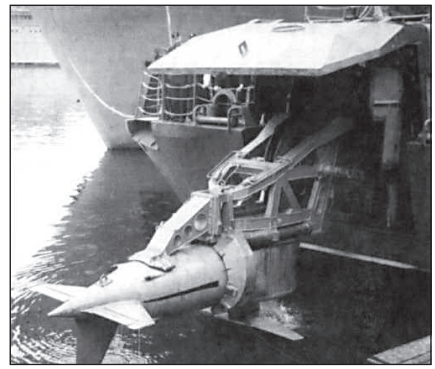


Рис. 5.24. ПОУКБ-1 и БУ ГАС МГ–325 «Вега» СКР «Дружный», Балтийск, 1998 г. [462]

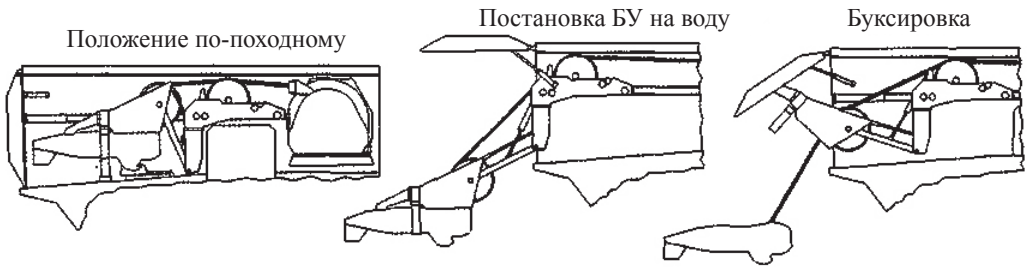


Рис. 5.25. Схема вывода подъемно-опускного устройства ПОУКБ-1 из кормового помещения СКР пр. 1135 [462, с. 31]



Рис. 5.26. ГАС МГ–325 «Вега» [462]

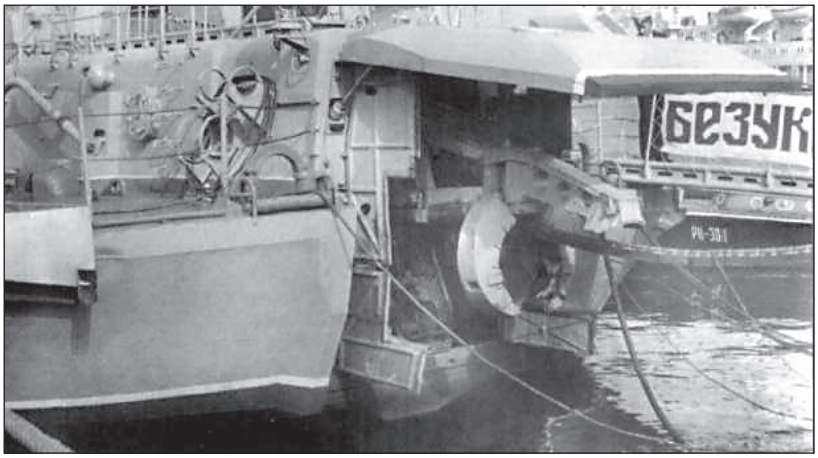


Рис. 5.27. Вид на ПОУ [462]

Основные составляющие ПОУКБ: специальная гидравлическая лебёдка ЛГС-13 для кабель-буксира, непосредственно спуско-подъемное устройство (СПУ), а также блоки гидравлики и система управления. Кабель-буксир снабжён каплевидными (в сечении) обтекателями, которые при намотке на барабан лебёдки должны устанавливаться в специальный винтовой ручей под определённым углом (требование разработчика кабель-буксира), поэтому лебёдку пришлось делать с коническим барабаном с наибольшим диаметром около 3 м. Это породило свои сложности. На серийных кораблях была применена лебёдка ЛГС-13П с цилиндрическим барабаном, так как требования к углу укладки обтекателей были изменены. Новые лебёдки изготавливались на Калужском турбинном заводе.



Рис. 5.28. Проверка работоспособности ПОУКБ–1 на СКР «Дружный» у причала в Балтийске, 1998 г. Фото И.Н. Селезнёва [462]

Подъёмно-опускное устройство кабель-буксирного типа ПОУКБ-1 для буксируемого носителя ГАС МГ–325 «Вега» было разработано Специальным конструкторским бюро по машиностроению (СКБМ) при Зеленодольском ПКБ по техническому заданию Северного ПКБ (рис. 5.28) [462, с. 30].

На БПК пр. 61 МП в семидесятых годах прошлого века была установлена гидроакустическая станция (ГАС) «Платина» с подкильной и буксируемой антенной, для обслуживания которой проектировщик корабля — Северное проектно-конструкторское бюро (СПКБ) — разработал спуско-подъемное устройство, размещенное внутри корпуса корабля, и применил лебедку ЛГС13П (разрабатывалась в ПКБ «Прогресс» в 1971-1972 гг.) [461].

Лебедка ЛЭГС17 (рис. 5.29) [461, с. 98] имела кабелеукладчик специальной конструкции с нарезным барабаном диаметром около 3 м для размещения кабель-буксира с обтекателями длиной несколько сотен метров (рис. 5.30) [461, с. 99].

Внутри барабана — планетарный редуктор с гидромоторами и совершенно необычный узел КПУ — кабелепереметывающее устройство. Последнее представляет собой две плоские вертикально расположенные соосно спирали, где при вращении барабана происходит перемотка кабеля с одной на другую спираль. При этом крайняя спираль, закрепленная к станине лебедки, неподвижна, а внутренняя вращается вместе с барабаном. Эта конструкция позволяет связать уложенный на барабане и вращающийся вместе с ним кабель-буксир с неподвижными лебедочными клеммными коробками и далее с приборным комплексом в посту

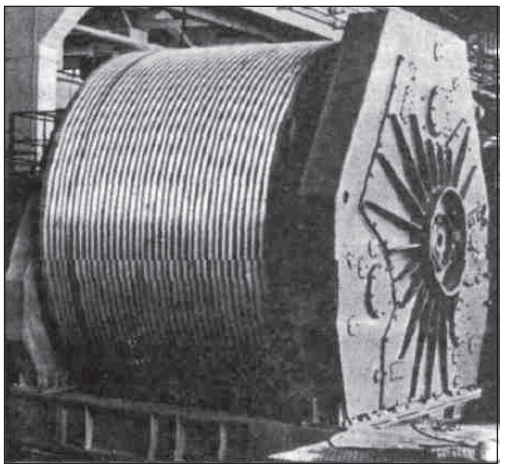


Рис. 5.29. Лебедка ЛЭГС17

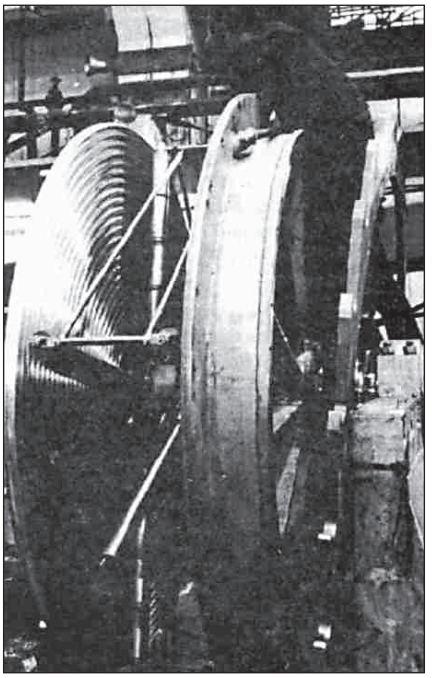


Рис. 5.30. Кабелепереметывающее устройство для лебедки ЛЭГС17

управления. Эта конструкция явилась результатом научно-исследовательских работ, выполнявшихся в ПКБ «Прогресс». Как отмечал д.т.н., профессор Б. А. Бугаенко [461], разработка СПУ, лебедок от первой карандашной линии на белом ватмане до изготовления и сдачи на ходовых испытаниях заняли около десяти лет (сдача в 1980 году).

Одним из наиболее простых устройств для обслуживания буксируемых контейнеров с научной аппаратурой является конструкция, показанная на рис. 5.31 [172, с. 196]. Рама *1* шарнирно установлена на корме судна. В верхней части рамы расположен шкив *4* для кабель-буксира *5,* шарнирный упор-захват *3* и кильблок *7*, на который в положении по-походному опирается контейнер с гидрографической аппаратурой *2*. Кабель-буксир одним концом заделан на контейнере, другим на барабане тяговой лебедки *6*. В процесс подъема контейнера в режиме буксировки контейнер находится в положении *III* [172, с. 196]. В начальный момент подъема устройство устанавливают в положение *II* за корму судна. Лебедка, работая на выбирание, подтягивает контейнер к упор-захвату, после чего рама заваливается на корму судна до упора в ограничитель *8*. В этом положении раму закрепляют, контейнер опускают на кильблок *7* и также закрепляют по-походному.

Вываливание рамы выполняется в обратном порядке. Однако этот процесс возможен лишь в том случае, если центр тяжести контейнера и рамы будет расположен в корму за шарниром (положение (*I'*). Существенный недостаток данной схемы в том, что контейнер выступает за корму судна, а это может привести к повреждению его при швартовке.

При равной грузоподъемности удельная материалоемкость устройства в 2,75 раза ниже СПУ параллелограммного типа, существенно меньше и его габариты [16, с. 99].

По окончании испытаний и опытной эксплуатации предсерийного образца ГАК «Звезда» для противолодочных кораблей среднего водоизмещения на переоборудованном по пр. 1135.3 СКР «Жаркий» в 1985 г. под индексом МГК-365 «Звезда-М1» комплекс был принят на вооружение (рис. 5.32 и 5.33) [462, с. 87].

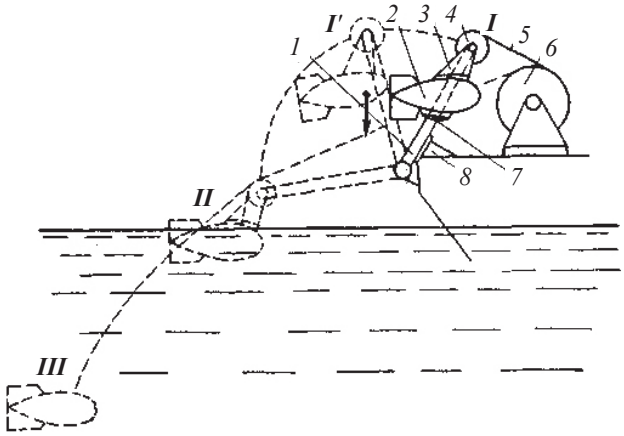


Рис. 5.31. Кормовое шарнирное устройство для спуска буксируемого аппарата

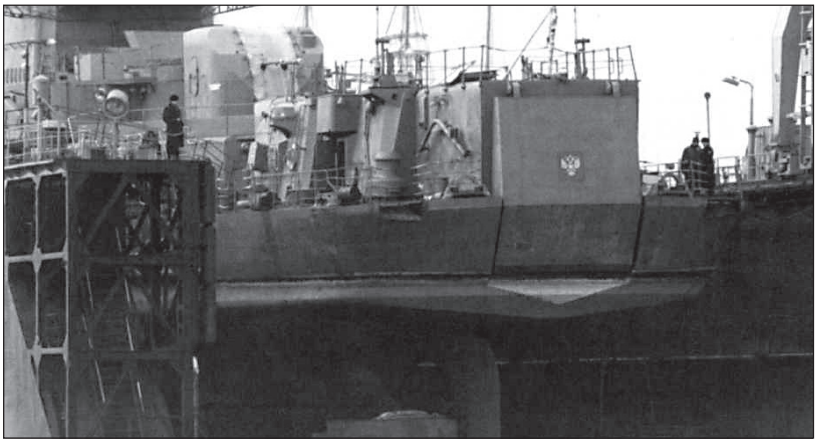


Рис. 5.32. Вид на корму БУ ГАК «Звезда-М1» [462, с. 87]

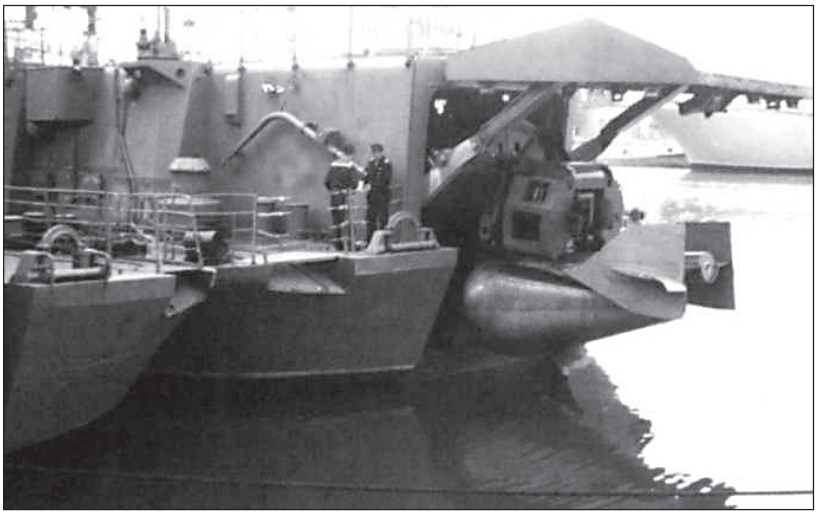
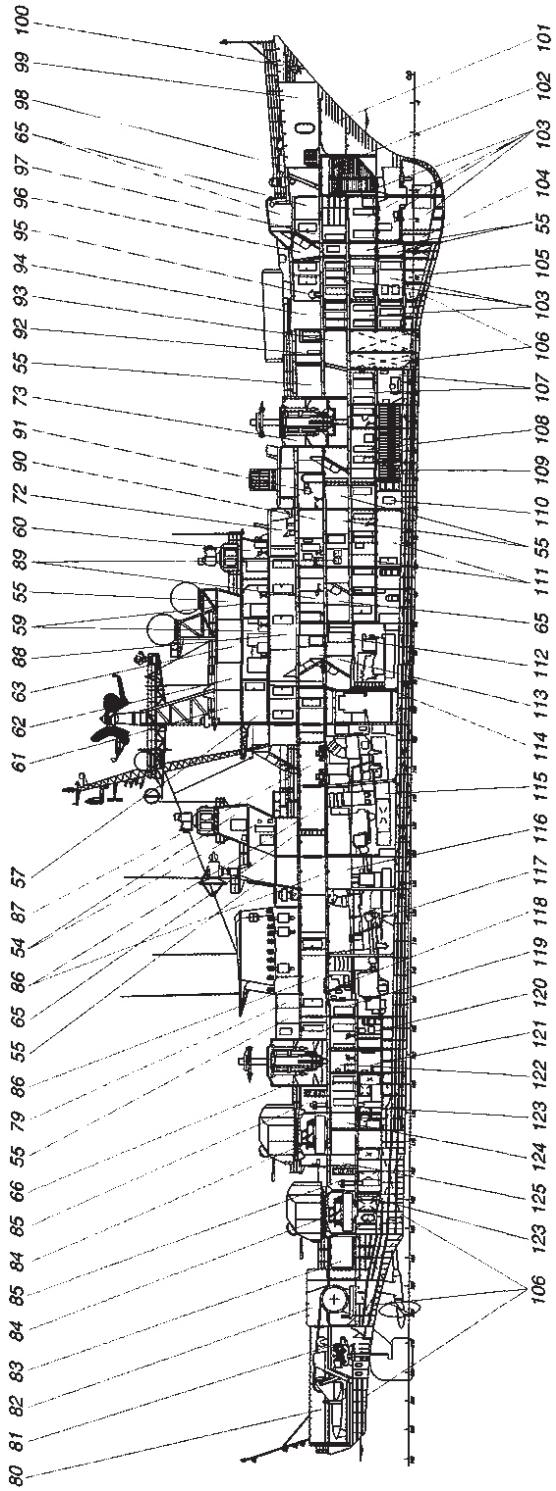


Рис. 5.33. БУ ГАК «Звезда-М1»

На схеме продольного разреза СКР пр. 1135 (рис. 5.34) [462] приведены помещения, в которых устанавливалось ПОУ «Вега» и БУ (поз. 80, поз. 82 — отделение лебёдки ГЛС «Вега»).

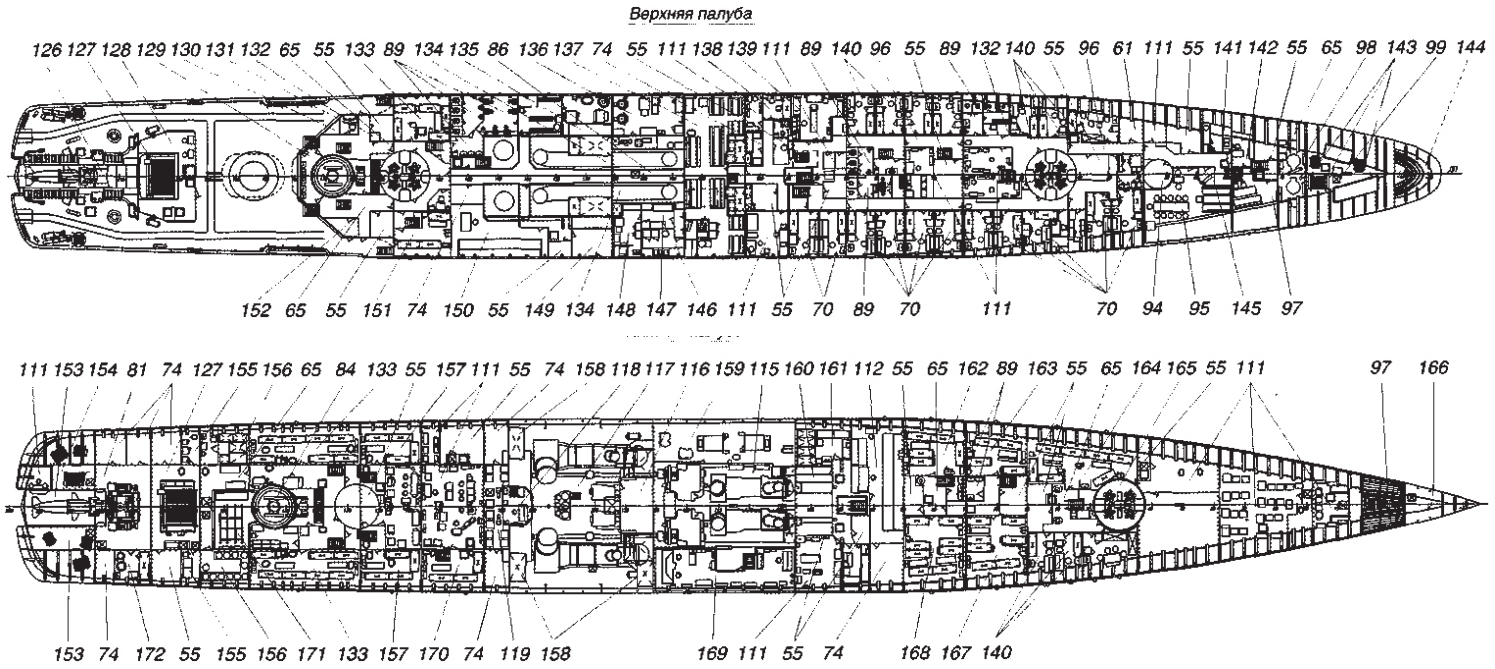
На рис. 5.34–5.35 приведены продольный разрез и верхняя и нижняя палубы СКР пр. 1135, на которых указаны размещение ПОУКБ–1 и БУ ГАС МГ–325 «Вега» [462]. На схеме рис. 5.36 показаны разрезы по верхней и нижней палубам СКР пр. 1135, на которых указаны эти же помещения: по верхней палубе — поз. 126 (пом. БУ «Вега» и ПОУ-КТ), поз. 127 (отделение лебёдки ГЛС «Вега»); на нижней палубе — поз. 153 (отделение БУ и ПОУ «Вега»).



Продольный разрез:

54 – Блоки ВЧ МР-105; *55* – Отделение вентиляторов; *57* – Сигнальная рубка; *59* – ФКП-ГКП; *60* – Ходовая рубка; *61* – Запасное помещение; *62* – Блоки ВЧ «Старт»; *63* – Блоки ВЧ «Муссон»; *65* – Тамбур; *66* – Погреб ЗИФ-122 №2; *72* – Кают-компания офицеров; *73* – Погреб ЗИФ-122 №1; *79* – Отделение шлангов; *80* – Отделение БУ и ПОУ «Вега»; *81* – Румпельное отделение; *82* – Отделение лебедки ГЛС «Вега»; *83* – Рефрижераторная камера; *84* – Подбашенное отделение; *85* – Перегрузочное отделение; *86* – Центральный коридор; *87* – Столовая команды; *88* – Коридор офицеров; *89* – Бытовое помещение; *90* – Боевой пост; *91* – Пост РБУ-6000; *92* – Арсенал; *93* – Пост «Муссон»; *94* – Отделение приводов КТ-М-1135; *95* – Кают-компания мичманов; *96* – Коридор мичманов; *97* – Ленкаюта; *98* – Шпилевая; *99* – Кладовая такелажа и тентов; *100* – Отделение приемников МИ-110Р; *101* – Форпик; *102* – Цепной ящик; *103* – БП «Титан-2»; *104* – Коффердам; *105* – Цистерна пресной воды; *106* – Топливные цистерны; *107* – Посты «Оса-М»; *108* – Рубка гидроакустики; *109* – Погреб РГБ-60; *110* – Носовое отделение водоотливного насоса; *111* – БП разного назначения; *112* – Носовая электростанция; *113* – Коридор носовой аварийной партии; *114* – Отделение успокоителей качки, дизель-генераторов, холодильных машин; *115* – НМО; *116* – Механическая мастерская; *117* – КМО; *118* – ПАУ; *119* – Отделение генераторов ГЛС «Вега»; *120* – Кормовой пост стабилизации; *121* – КХП; *122* – Пост МР-105; *123* – Погреба боезапаса АК-726; *124* – Пост «Оса-М»; *125* – Коридор кормовой аварийной партии

Рис. 5.34. Продольный разрез СКР пр. 1135 [462]



Верхняя и нижняя палубы:

55–Отделение вентиляторов; *61*–Запасное помещение; *65*–Тамбур; *70*–Каюта офицеров; *74*–Кладовые; *81*–Румпельное отделение; *84*–Подбашенное отделение; *86*–Центральный коридор; *89*–Бытовое помещение; *94*–Отделение приводов КТ-М-1135; *95*–Кают-компания мичманов; *96*–Коридор мичманов; *97*–Ленкаюта; *98*–Шпилевая; *99*–Кладовая такелажа и тентов; *111*–БП разного назначения; *112*–Носовая электростанция; *115*–НМО; *116*–Механическая мастерская; *117*–КМО; *118*–ПАУ; *119*–Отделение генераторов ГЛС «Вега»; *126*–Помещение БУ «Вега» и ПОУ-КТ; *127*–Отделение лебедки ГЛС «Вега»; *128*–Пост управления КЛ-101; *129*–Умывальная команды; *130*–Станция орошения; *131*–Канцелярия; *132*–Ингибиторная; *133*–Кубрик на 14 чел.; *134*–Коридор газоходов; *135*–Прачечная; *136*–Камбуз; *137*–Столовая команды; *138*–Лазарет; *139*–Амбулатория; *140*–Каюты мичманов; *141*–Буфет мичманов; *142*–Библиотека; *143*–Вьюшки; *144*–Отделение МИ-110; *145*–Киноаппаратная; *146*–Посудомойня; *147*–Хлеборезка; *148*–Хлебопекарня; *149*–Текстильная и бельевая кладовая; *150*–Кормовая электростанция; *151*–Кубрик на 9 человек; *152*–Рубка дежурного по кораблю; *153*–Отделение БУ и ПОУ «Вега»; *154*–Отделение вьюшек; *155*–Погреб ТРС-82; *156*–Кладовая мокрой провизии; *157*–Кубрик на 8 человек; *158*–Масляная цистерна; *159*–Котельное отделение; *160*–Агрегатная; *161*–Кладовая сухой провизии; *162*–Кубрик на 10 человек; *163*–Кубрик на 11 человек; *164*–Кубрик на 19 чел.; *165*–Погреб ЗИФ-122; *166*–Малярная, кладовая стройматериалов; *167*–Кубрик на 18 чел.; 168. Кубрик на 16 человек (боевой лазарет); *169*–ПЭЖ; *170*–Кубрик на 6 человек; *171*–Рефрижераторная камера; *172*–Отделение СУВЗ

Рис. 5.35. Верхняя и нижняя палубы СКР пр. 1135 [462]

Необходимо отметить, что на кораблях типа СКР водоизмещением 2200 – 3000 т размещение подобных устройств ПОУ и БУ было довольно затруднительным и накладывало определённые ограничения при проектировании и эксплуатации, что, кстати, отмечал Б.А. Бугаенко [461]. В состав комплекса входили две антенны обнаружения ПЦ. Одна антенна устанавливалась в стационарном металлическом звукопрозрачном НБО, вторая антенна была буксируемой (рис. 5.36) [462]. Подъем и погружение буксируемой антенны осуществлялось спуско-подъемным устройством (СПУ) на глубины более 100 м. Сама антенна размещалась в специальном носителе (БН — буксируемый носитель), который по-походному размещается в помещении СПУ на кильблоках. Буксировка носителя осуществлялась с помощью кабель-буксира длиной 300 м. Предельная скорость буксировки — 25 уз. Разделением на стационарные и буксируемые части обеспечивалась работа комплекса в различных гидрологических условиях. Спуско-подъемное и буксируемое устройства разрабатывались в ПКБ «Прогресс», г. Николаев.

Уникальной особенностью ПКР «Москва» (рис. 5.36) стало применение сверхмощной гидроакустической станции «Орион», не имевшей аналогов в мире [463]. Ее антенна размещалась в огромном титановом обтекателе размерами 21×6,5×9 м, выдвигавшемся из расположенной в корпусе корабля шахты специальным подъемно-опускным устройством ГТОУ–20 [463, с. 26]. В рабочем положении обтекатель увеличивал осадку крейсера на 5 м; при этом для обеспечения остойчивости принималось не менее 230 т водяного балласта. Общая масса антенны вместе с обтекателем и ПОУ–20 составляла 200 т.

«Орион» дополнялся буксируемой ГАС «Вега», антенна которой (так называемое «буксируемое тело») могла опускаться на кабель-тросе на глубину до 200 м для поиска подводных целей под «слоем скачка» [463, с. 26]. Дальность эхопеленгования этой станции теоретически составляла 15 км, буксировка могла осуществляться при скорости корабля от 5 до 25 узлов.

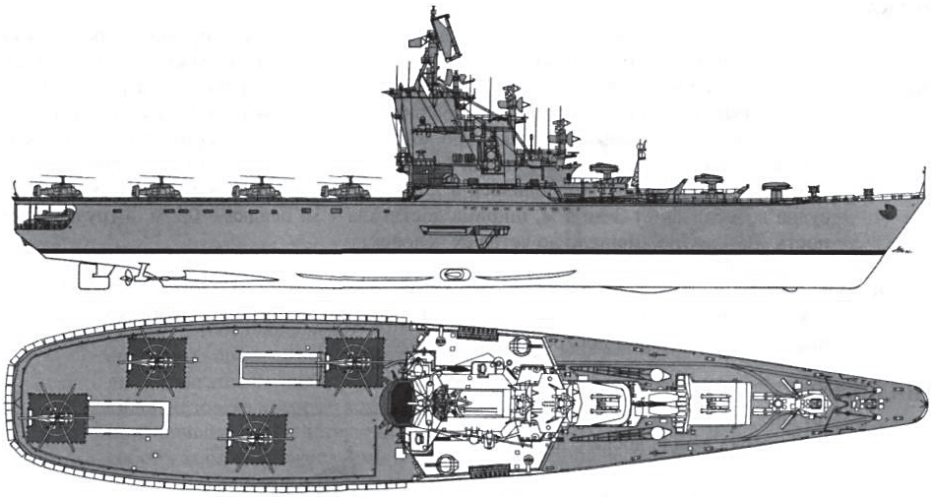


Рис. 5.36. Крейсер-вертолетоносец советского ВМФ «Москва» (пр. 1123) [463, 464]

На рис. 5.37 приведены ПОУ и «тело» буксируемой ГАС «Вега» на корме крейсера «Москва» под полётной палубой [41, с. 26].

В 1971 г. по приказу МСП начинается проектирование СПУ буксируемых систем «Полином» и «Кайра» для корабля проекта «Орлан» (рис. 5.38 и 5.39).

В этом же году были выполнены технические проекты (интересно отметить, что вариант антенны «Кайра», для которой проектировалось СПУ, состоял из подвижно связанных между собой металлических секций, которые необходимо было пропускать через шкивы и наматывать на барабан лебедки — от этого варианта в дальнейшем отказались) [461, с. 94]. Впервые в отечественной и мировой практике устройство входило в контакт с заглубителем при его подводном положении, что принципиально важно для правильной ориентации заглубителя относительно захвата СПУ и, следовательно, надежного проведения этой ответственной операции. Рабочие проекты СПУ и лебедок ЛЭГС 16 и ЛЭГС 17 завершены в 1974 году.

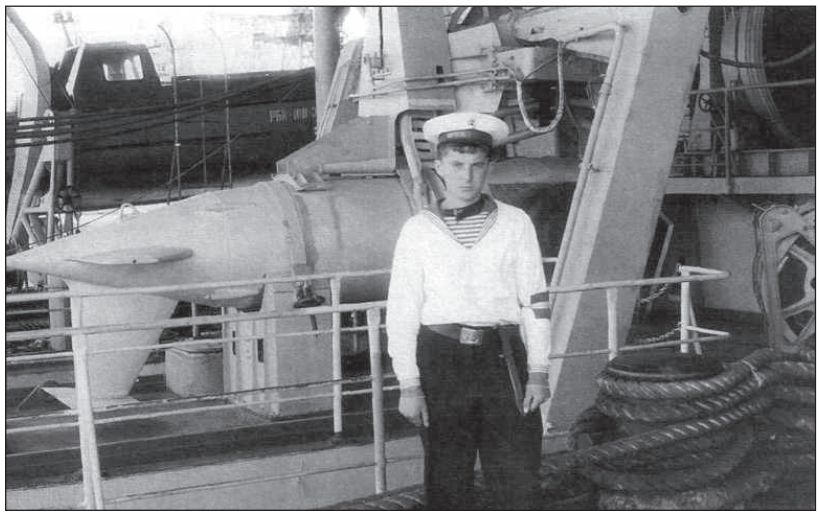


Рис. 5.37. Вахтенный матрос у ПОУ и «тела» буксируемой ГАС «Вега». Крейсер «Москва» [41, с. 26]

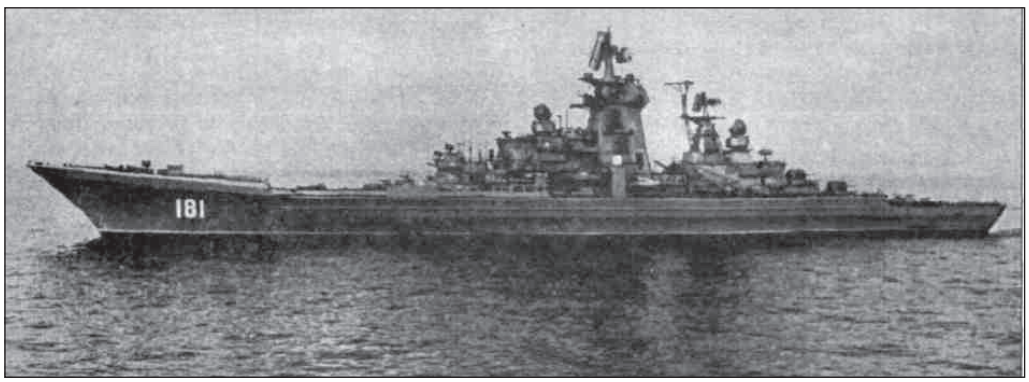


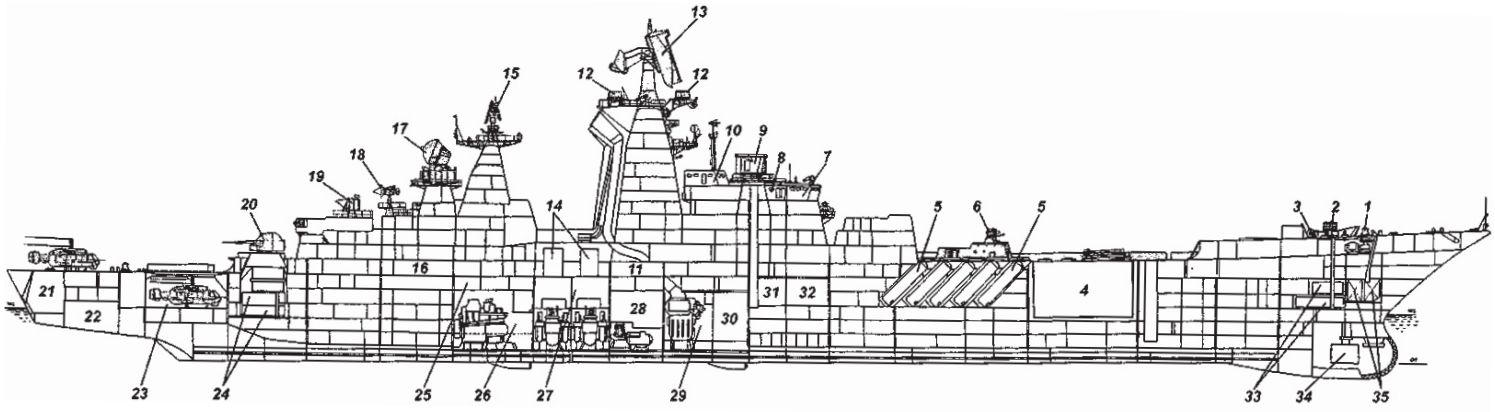
Рис. 5.38. Атомный крейсер «Киров» [461, с. 94]





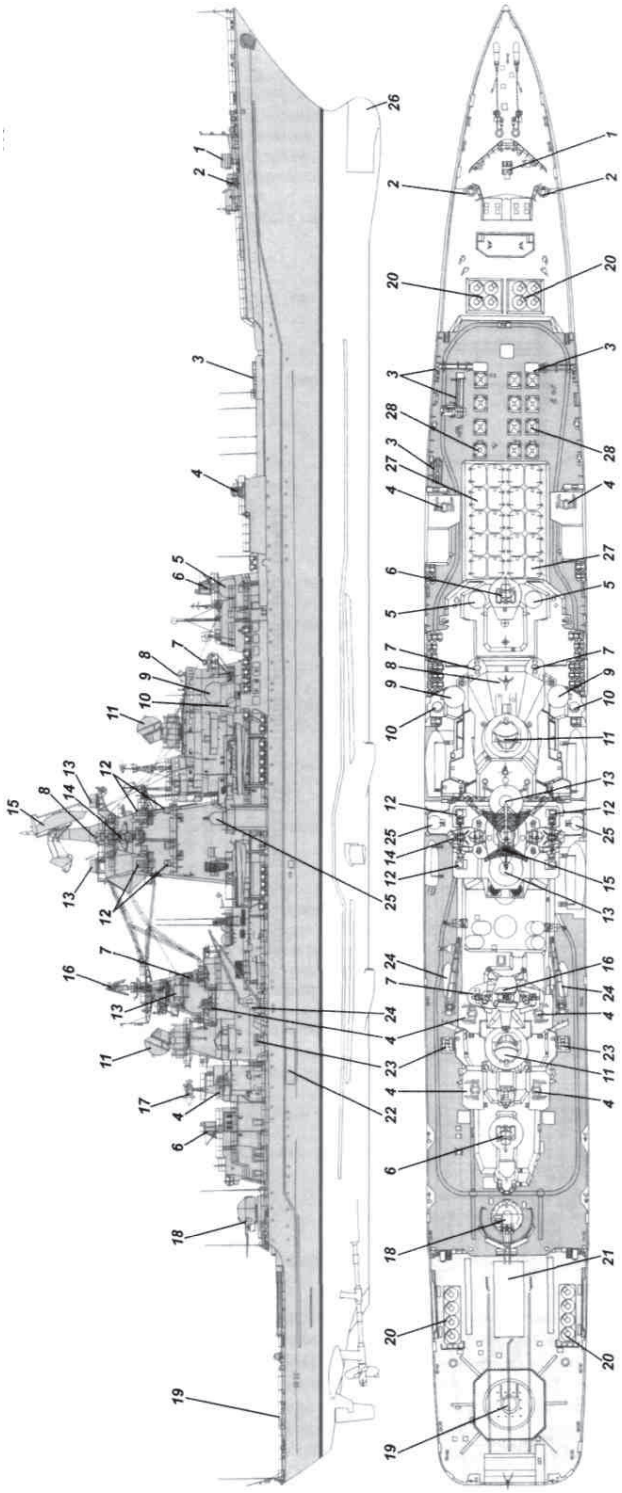
Рис. 5.39. СПУ, кормовое закрытие и площадка посадки вертолета [461, с. 95]

На рис. 5.40 [43] приведен продольный разрез ТАВКР «Пётр Великий» (пр. с.1144.2) (поз. 21 — выгородка буксируемой антенны ГАК «Полином») [465, с. 114], а на рис. 5.41 — схема наружного вида ТАВКР типа «Киров» [465, с. 113].



1 – якорный шпиль; 2 – РБУ-6000; 3 – ПУ НУРС СППП ПК-2; 4 – ВПУ ЗРК «Форт» и «Форт-М»; 5 – ПУ ПКРК «Гранит»; 6 – боевой модуль ЗРАК «Кортик»; 7 – ходовая рубка; 8 – центральная штурманская рубка; 9 – АП РЛС СУО «Форт-М»; 10 – оперативная рубка; 11 – носовой отсек резервных источников тока ЭЭС (два ДГ мощностью по 1500 кВт каждый); 12 – АП сисистемы «Привод-В»; 13 – АП РЛС «Восход»; 14 – шахта перезагрузки АЗ реакторов; 15 – АП РЛС «Фрегат-М2»; 16 – кормовой отсек резервных источников тока ЭЭС (два ДГ мощностью по 1500 кВт каждый); 17 – АП РЛС СУО ЗРК «Форт»; 18 – АП РЛС СУАО «Лев»; 19 – АП РЛС СУО ЗРК «Кинжал»; 20 – 130-мм АУ АК-130; 21 – выгородка буксируемой антенны ГАК «Полином»; 22 – румпельное отделение; 23 – ангар для вертолетов; 24 – погреб 130-мм выстрелов; 25 – кормовая электростанция левого борта; 26 – кормовое МО (ПТУ по правому борту и два АТГ мощностью по 3000 кВт каждый – по левому борту); 27 – реакторный отсек; 28 – отсек вспомогательных механизмов и успокоителя качки; 20 – отсек вспомогательного парового котла; 30 – носовое МО (ПТУ по левому борту и два АТГ мощностью по 3000 кВт каждый – по правому борту); 31 – боевая рубка (ГКП); 32 – БИП; 33 – погреб ГБ РБУ-6000; 34 – носовая антенна ГАК «Полином»; 35 – цепной ящик.

Рис. 5.40. Продольный разрез ТАРКР «Петр Великий» (пр. 11442)



1 – РБУ-6000; 2 – ПУ НУРС СППП ПК-2; 3 – устройства погрузки боезапаса; 4 – боевой модуль ЗРАК «Кортик»; 5 – командный модуль ЗРАК «Кортик»; 6 – АП СУО ЗРК «Кинжал»; 7 – стабилизированный пост ТВ системы наблюдения за ближней наружной обстановкой «Ротан»; 8 – АП РЛС «Вайгач»; 9 – АП комплекса космической связи «Кристалл-БК»; 10 – АП астрокорректора; 11 – АП РЛС СУО ЗРК «Форт»; 12 – АП комплекса средств РЭБ «Кантата-М»; 13 – АП системы «Привод-В»; 14 – АП РЛС «Подкат»; 15 – АП РЛС «Восход»; 16 – АП РЛС «Фрегат-М2»; 17 – АП РЛС СУАО «Лев»; 18 – 130-мм АУ АК-130; 19 – ВПП; 20 – ВПУ ЗРК «Кинжал»; 21 – вертолетоподъемник; 22 – лацпорт РТПУ ПЛРК «Водопад»; 23 – РБУ-12 000 комплекса ПТЗ «Удав-1»; 24 – подъемный кран для погрузки боезапаса и общесудовых нужд; 25 – АП комплекса «Корал-БН»; 26 – обтекатель носовой антенны ГАК «Полином»; 27 – крышки ПУ ПКРК «Гранит»; 28 – крышки ВПУ ЗРК «Форт».

Рис. 5.41. Схема наружного вида ТАРКР пр. 11442

Для увеличения устойчивости контейнера при вываливании-заваливании и сохранения его горизонтального положения применяют устройства с параллелограммным выносным механизмом (рис. 5.42) [172, с. 197].

На верхней оси поворотной рамы *4* установлен шкив *8* и захват *6,* шарнирно связанный также с двумя тягами *3,* нижние концы которых с помощью осей установлены на упорах *1* за бортом судна. Геометрия этих подвижных элементов такова, что балки рамы и захват образуют подвижный параллелограмм.

При повороте рамы *4* оси захвата описывают траектории, показанные на рис. 5.43 пунктирными линиями, а сам захват остается в процессе вываливания параллельным своему исходному положению. Это обеспечивает горизонтальный вынос контейнера *5* за корму.

Приводом вываливания служит механизм *2* рычага *12,* обеспечивающего вращение рамы *4* и ее поворот через промежуточный шарнирный рычаг *11.* Кабель-буксир травят и выбирают с помощью лебедки *10.* Нормальную укладку кабель-буксира с обтекателями осуществляют с помощью кабелеукладчика *9.* На захвате укреплены ограждающие дуги *7,* назначение которых — обеспечить необходимую центровку контейнера при подходе его к захвату.

Продольная балка *8* жестко связана с рычагом *10,* конец которого соединен с шарнирной тягой *9* [172, с. 198]. Оси стрелы и шарнирной тяги расположены так, что стрела, тяга и рычаг образуют параллелограммный механизм, обеспечивающий горизонтальное положение продольной балки с поперечинами при вываливании-заваливании стрелы. Такая конструкция с учетом грузовой канатной проводки в виде оттяжек, сходящихся под углом к подвесам, исключает раскачивание контейнера при выносе и спуске его за борт. Проводка грузовых канатов на подвижных элементах устройства выполнена с помощью шкивов *4*,

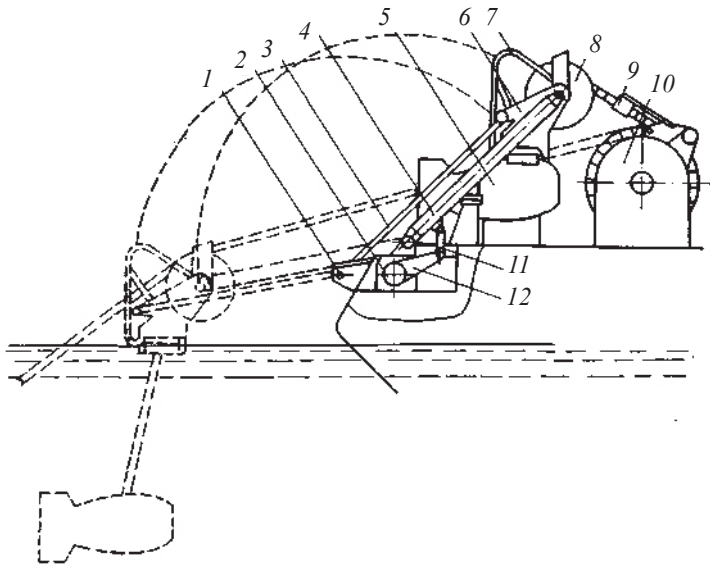


Рис. 5.42. Устройство для спуска буксируемого аппарата параллелограммного типа

установленных соосно с шарнирами параллелограммного механизма. Это позволяет вываливать-заваливать контейнер без включения грузовой лебедки *5*, которую используют лишь для спуска-подъема за бортом. Кабель-буксир от контейнера проходит через кормовой блок *14* на тяговую лебедку *13*. После спуска контейнера за борт его проводят за корму и буксируют для проведения исследований.

На рис. 5.43 и 5.44 приведены примеры устройства с параллелограммным выносным механизмом [275, с. 84] для спуска глубоководного спасательного аппарата SR-1 (масса 27 т, длина 8,7 м), предназначенного для эвакуации с глубины до 600 м одновременно до 15 членов экипажа аварийной ПЛ.

5.4.4.3. Условия работы устройств, установленных на судне, не имеющем хода, и задачи их проектирования

В [172, с. 199] рассмотрен порядок операций по подъему контейнера с научной аппаратурой в устройстве шахтного типа. Подъем можно разделить на четыре этапа:

1) отрыв контейнера от грунта;
2) движение контейнера в толще воды;
3) вход контейнера в шахту и движение его до выхода из воды;
4) подъем контейнера после отрыва от воды.

На всех этапах подъема воздействие внешних факторов на поднимаемый объект сводится к кинематическому возбуждению системы «канат – поднимаемый объект», вызванному качкой судна и выбиранием каната лебедкой, и к усилиям взаимодействия объекта со средой. Это взаимодействие на разных этапах имеет свои особенности. На первых трех — объект взаимодействует с водой, при этом учитываются присоединенные массы и силы сопротивления движению, которые лучше всего исследованы для случая погружения тела в безграничную жидкость (что наблюдается при движении объекта в толще воды).

На первом и третьем этапах существенное влияние на погруженный объект оказывают границы раздела жидкости. На четвертом этапе отсутствует взаимодействие жидкости с поднимаемым объектом, и это упрощает решение задач.



Рис. 5.43. Система спасения экипажей аварийных подводных лодок — NSRS (NATO Submarine Rescue System)

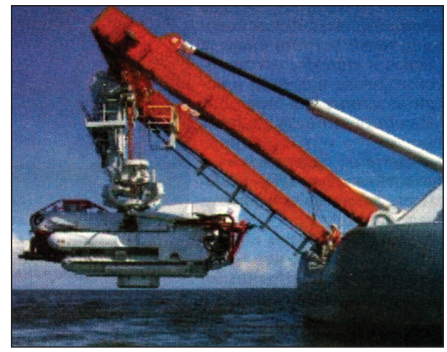


Рис. 5.44. Глубоководный спасательный аппарат SR-1

Рассматривая весь процесс подъема, можно выделить три общие задачи, решение которых дает исходные данные для проектирования составных элементов устройства. Первая — определение натяжения в кабель-тросе. На различных этапах подъема решение этой задачи имеет разную сложность из-за необходимости учета таких факторов, как наличие дна, шахты и т. п. Вторая — определение перемещений объекта от качки судна. Ее решение связано, как правило, с первой. Она имеет особую актуальность, когда необходимо стабилизировать положение контейнера в толще воды. Третья задача связана с ограничением опасных воздействий на контейнер в момент подхода его к шахте и контакта с конструкциями устройства. Эта задача характерна для начала третьего этапа подъема.

Движение судна существенно меняет характер работы кабель-троса. Из особенностей, влияющих на конструктивную схему устройств, обслуживающих такие системы, отметим значительное сопротивление движению кабель-буксира и контейнера-заглубителя в воде. Снизить сопротивление удается путем придания контейнерам обтекаемой формы, а также за счет изменения формы поперечного сечения кабель-буксира [172, с. 194].

Сформулированные задачи являются определяющими не только для шахтных устройств. Для кормовых и бортовых устройств лишь уменьшается влияние корпусных конструкций на процесс подъема на третьем этапе, остальные же этапы одинаковы по характеру учета основных факторов внешнего воздействия.

Рассматриваемые процессы, как отмечает Б. А. Бугаенко [461], нестационарны, что существенно усложняет решение задач. Например, длина кабель-троса, от которой зависят упругие свойства системы, меняется по мере подъема.

5.4.5. Оценка прочности деталей при проектировании

В основу расчетов на прочность положена теория сопротивления материалов, которая определяет деформации от силового воздействия на материалы. При этом силовое воздействие рассматривают как статическое приложение нагрузки. В реальных машинах внешние нагрузки прикладываются динамически, т. е. с определенной амплитудой и частотой, в результате чего возникают упругие деформации, которые теория сопротивления материалов не принимает и рассматривает тело как абсолютно твердое [457, с. 17]. Между тем при неустановившемся режиме работы машины часть кинетической энергии движущихся частей превращается в потенциальную энергию деформации других ее частей, при этом значения напряжения будут зависеть от деформации всей системы. Таким образом, теория сопротивления материалов не рассматривает взаимосвязей деталей, что не позволяет по принятым методам расчета определить напряженное состояние детали, зависящее от динамики всей системы элементов машин. Несмотря на это, в инженерной практике в основу прочностных расчетов деталей машин положена теория сопротивления материалов, дающая удовлетворительные результаты. Однако в отдельных случаях возникают поломки деталей машин, хотя запасы прочности во всех этих элементах при их проектировании были более чем достаточны.

Анализируя поломки судовых машин и механизмов [457], их можно разделить на две основные группы. К первой относятся поломки, вызванные повышенными против расчета напряжениями, являющимися результатом неточного определения расчетных нагрузок и концентрации напряжений. Ко второй — поломки, вызванные динамическими нагрузками, возникающими в машинах под действием сил инерции масс самой машины.

При проектировании судовых машин принято оценивать их прочность по статическим нагрузкам — статическая прочность и по динамическим — усталостная прочность.

Статическая прочность. Статическую прочность оценивают по условию прочности, разработанному на основе фактических и допускаемых напряжений [457]:

$$\sigma \le [\sigma];\ \tau \le [\tau], \tag{5.39}$$

где σ, τ — нормальные и касательные напряжения в опасном сечении детали (за опасное сечение принимают то, в котором действуют максимальные нагрузки); $[\sigma]$, $[\tau]$ — допускаемые напряжения материала рассчитываемой детали, равные

$$[\sigma] = \sigma_{пр}/\sigma_т,\ [\tau] = \tau_{пр}/\tau_т, \tag{5.40}$$

где $\sigma_{пр}$, $\tau_{пр}$ — предельные напряжения для данного материала.

Для пластичных материалов в качестве предельного напряжения принимают предел текучести $\sigma_т$, $\tau_т$. Если материал детали имеет поверхностное упрочнение, то

$$\sigma = (\sigma_т^с + \sigma_т^п)/2, \tag{5.41}$$

где $\sigma_т^с$ — предел текучести сердцевины детали; $\sigma_т^п$ — предел текучести материала поверхностного слоя.

Для хрупких материалов в качестве предельного напряжения принимают предел прочности $\sigma_в$ (временное сопротивление), т. е. $\sigma_{пр} \approx \sigma_в$.

Запас статической прочности $s_т$. Минимально допустимые запасы прочности выбирают в зависимости от характеристики материала и достоверности расчетных нагрузок. Ниже приведены значения запасов статической прочности при учете только основных нагрузок ($s^*_{тmin}$ — нагрузки проверены экспериментально):

$\sigma_т/\sigma_в$	0,5…0,7	0,7….0,9
S_{min}	2,0	2,4
$s^*_{тmin}$	1,4	1,7

(5.42)

Статическую прочность оценивают по фактическому и минимально допустимому запасам прочности [457, с. 18-19]:

$$s_{п\sigma} = \sigma_т/\sigma_{max} \ge s_{пmin};\ s_{т\tau} = \tau_в/\tau_{max} \ge s_{тmin}, \tag{5.43}$$

где $\tau_в$ — предел прочности при кручении.

Усталостная прочность. Эту прочность оценивают по запасам прочности. Для деталей, подверженных циклическому нагружению (симметричный цикл),

предельными напряжениями будут напряжения, соответствующие пределу выносливости с учетом концентрации напряжений, состояния поверхности и коэффициента влияния абсолютных размеров детали:

$$s_\sigma = \sigma_{пр}/\sigma_a \geq s_{min};\ s_\tau = \tau_{пр}/\tau_a \geq s_{min};$$
$$\sigma_{пр} = \sigma_{-1}\varepsilon\beta/k_\sigma;\ \tau_{пр} = \tau_{-1}\varepsilon\beta/k_\tau, \quad (5.44)$$

где ε — коэффициент, учитывающий влияние поверхностного упрочнения; β — коэффициент влияния абсолютных размеров рассматриваемого сечения; σ_a, τ_a — амплитудные напряжения цикла; s_{min} — минимально допустимый запас усталостной прочности, выбирается по рекомендациям, разработанным на основе опыта эксплуатации судовых машин и механизмов; k_σ, k_τ — коэффициенты концентрации напряжений. Для асимметричного цикла нагружения

$$s_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a k_\sigma/(\varepsilon\beta) + \psi_\sigma\sigma_m};$$
$$s_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_a k_\tau/(\varepsilon\beta) + \psi_\tau\tau_m}, \quad (5.45)$$

где ψ_σ и ψ_τ — коэффициент чувствительности асимметрии цикла по нормальным и касательным напряжениям; $\sigma_т$, $\tau_т$ — средние напряжения цикла.

При сложном напряженном состоянии детали при любых циклах нагружений коэффициент запаса усталостной прочности

$$s = s_\sigma s_\tau / \sqrt{s_\sigma^2 + s_\tau^2} \geq s_{min}. \quad (5.45)$$

На современных судах используют большое количество машин, механизмов и устройств. При этом на каждом судне нового класса необходимы более современные машины и механизмы, которые в большинстве случаев отличаются не только технико-экономическими характеристиками, но и конструктивным решением [158, с. 3]. По специфике работы суда оторваны на длительное время от своих баз и им нельзя оказать техническую помощь в случае отказа той или иной машины, поэтому при проектировании надо обеспечить необходимую прочность и надежность оборудования. Эта проблема не нова, она постоянно требовала внимания и особенно остро ощущается при создании современных судовых машин, для которых характерна сложность конструкций, включающих многопостовое дистанционное управление, следящие системы какого-то параметра, автоматику, телемеханику и др.

Следует отметить, что в вопросах проектирования современных судовых машин наметилась тенденция повышения мощности и скорости исполнительных органов, что приводит к повышенным уровням нагрузок и частотам их приложения. Это, в свою очередь, потребовало пересмотра норм усталостной прочности судовых машин с целью обеспечить им надежность.

Одна из технических проблем при создании судовых механизмов (СМ) — это рациональный выбор расчетных нагрузок. Решение данного вопроса позволяет

создать СМ высокой надежности, более рентабельно использовать энергетическую установку судна, а также объемы судовых помещений, в которых они устанавливаются [459, с. 156].

Многие исследователи посвятили свои работы исследованию нагрузок, действующих на рабочие органы лебёдок. Исследованию характера нагрузок посвящены работы Н. М. Сабуренкова [472] и О. И. Саковца [474].

В связи с повышением мощности СМ, увеличением воспринимаемых и передаваемых нагрузок на рабочих органах (РО) и частот их приложения расчеты на прочность требуют все большей точности. Характерная особенность нагружения СМ — переменная нагрузка, оказывающая наиболее неблагоприятное влияние на элементы конструкции в течение всего периода эксплуатации, вследствие чего особое значение приобретает сопротивление усталости. При этом возникает необходимость определить их составляющие: амплитудные и средние значения нагрузок.

Таким образом, решение проблемы обеспечения прочностной надежности элементов конструкций СМ на стадии их проектирования и расчета в значительной степени зависит от достоверности информации о возникающих в процессе эксплуатации воздействиях (нагрузках), которая используется непосредственно для их анализа.

В результате проведенных исследований случайных процессов нагружения на входе (со стороны РО) и выходе (со стороны приводного электродвигателя) СМ, в частности палубных механизмов, предлагается метод определения предельного состояния элементов конструкций СМ. Метод позволяет более полно учитывать факторы действительной нагруженности в реальных условиях эксплуатации механизма и приблизить условия расчета СМ к условиям работы данного механизма.

Были исследованы нагрузки различных уровней СМ, для чего в качестве примера была взята траловая лебедка, по известным вероятностям появления нагрузок различного уровня и их суммарному числу циклов построены графики повторяемости нагрузок за весь срок службы СМ. Данные графики отображают картину действия уровней нагрузок за весь срок службы механизма [459, с. 156]. Для отдельных элементов конструкций СМ разработана модель отказа, причиной которого является потеря усталостной прочности. Построение такой модели имеет смысл, если максимальная нагрузка превышает нагрузку, вызывающую напряжения в сечении детали, равные пределу выносливости материала. В случае, когда максимальная нагрузка не вызывает напряжения, превышающего предел выносливости материала, деталь работает безотказно при циклическом нагружении. Применение разработанного метода определения предельного состояния элементов конструкций СМ на стадии их проектирования и расчета позволяет уменьшить их массо-габаритные показатели и разработать механизмы, обладающие высокой надежностью [459, с. 156].

Каждый натурный эксперимент в этой области позволяет получить новые данные и расширить наши представления о физических процессах, происходящих в траловом комплексе и процессах нагружения.

Необходимо отметить, что имеющиеся в настоящее время методы расчета СПМ на прочность удобны непосредственно при проектировании. Основное внимание в этих расчетах уделяется физическим основам решаемой задачи, простоте и удобству расчетов, а также анализу допустимого уровня напряженности. При этом расчеты приводятся в форме, рекомендуемой в ГОСТах и нормативных руководствах, или в форме, используемой в отечественной и зарубежной практике, что позволяет использовать их для накопления статистических данных по напряженности деталей.

Прочность элементов конструкций оценивается на основе сопоставления возникающих в них усилий от действующих механических нагрузок с теми усилиями, которые приводят эти элементы в предельное состояние. Оценка прочности проводится по допускаемым напряжениям, запасам прочности и вероятности разрушения (или вероятности неразрушения).

Оценка прочности по допускаемым напряжениям удобна, если на практике для однотипных конструктивных элементов, стабильных условий нагружения, сложившейся технологии производства разработана система допускаемых напряжений [475]. Однако ей присущи и существенные недостатки. Величина допускаемого напряжения носит условный характер, так как не отражает режима нагружения и ряда других факторов. Допускаемые напряжения, особенно при действии переменных нагрузок, в значительной степени зависят от геометрии деталей (концентрации напряжений), материала, срока службы и технологии изготовления, что затрудняет их применение в качестве нормативной характеристики. В современных инженерных расчетах допускаемые напряжения используются, главным образом, для приближенных предварительных расчетов [475, 476].

Наибольшее распространение получили расчеты по запасам прочности. В сложных случаях (например, нестационарные режимы нагружения) при определении запасов прочности используют условия суммирования повреждений. Необходимо отметить, что величина допустимого запаса прочности оказывает влияние на габариты и массу проектируемых изделий, а значит, и на их стоимость и эксплуатационные расходы. С уменьшением допустимого запаса прочности снижается масса изделий, но увеличивается возможность отказов — снижается надежность.

Также распространен расчет с помощью эквивалентного числа циклов нагружения. Суть его сводится к замене действия всего комплекса нагрузок (напряжений) действием одной, обычно максимальной нагрузки (напряжения) с эквивалентным числом циклов нагружения [475].

В ряде областей машиностроения созданы нормы прочности, регламентирующие допускаемые запасы прочности и условия их определения. В судостроении, например, в качестве нормативных берутся нагрузки, соответствующие наиболее тяжелому возможному режиму эксплуатации в отношении волнения, скорости хода и изгиба на тихой воде. При этом используются следующие поправочные коэффициенты: на точность оценки функций внешнего нагружения 1,5–2,0, на точность применяемых математических моделей 1,2–2,0, на точность самих методов расчета 1,2–1,5. Общий поправочный коэффициент, подобный коэффициенту безопасности, может изменяться в диапазоне 2,0–6,0 [201].

При недостаточной достоверности расчетных нагрузок, в особенности при возможном их динамическом приложении, величины запасов прочности следует увеличивать в 1,5–2,0 раза [476].

В условиях длительной работы СПМ при воздействии переменных напряжений с большим числом циклов (исчисляемых миллионами) предельные состояния определяются теми состояниями металла, которые в нем накапливаются в результате циклического деформирования (процесса усталости). При этом напряженное состояние можно рассматривать как упругое и неизменное во времени. Необходимо отметить, что усталостные поломки составляют основной вид разрушения деталей СПМ и возникают, как правило, внезапно и нередко приводят к тяжелым последствиям.

Авторы работ [478, 479, 480] отмечают, что запасы прочности, выраженные через напряжения, обеспечивают большую надёжность расчёта сравнительно с запасами, выраженными через числа циклов. Определение запасов прочности основывается на расчётных кривых усталости, по которым накопление повреждения может рассматриваться как простое линейное. Наличие такой кривой усталости, построенной для одного из напряжений спектра, как его параметра, в зависимости от суммарного числа повторения напряжений даёт достаточно полное представление о сопротивлении усталости. Здесь же отмечается, что многообразие и аналитическая сложность статистических описаний действительной нестационарной нагруженности деталей заставляют обратиться к такой систематизации спектров напряжений, которая, давая простые формы функции распределения величин напряжений, позволяла бы достаточно полно характеризовать накопление повреждения. Расчёт на прочность при этом заключается в определении запаса прочности n на основе условия перехода к предельному состоянию по напряжениям путём их пропорционального увеличения по всему спектру или путём пропорционального снижения ординат кривой усталости материала детали.

Необходимо отметить, что основной задачей современных методов расчёта на прочность деталей машин и механизмов в связи с их надёжностью является определение вероятности разрушения и плотности распределения фактических сроков службы на основе статистики механических свойств материала, разрушения деталей и характера внешних эксплуатационных воздействий. Используется терминология теории надёжности, где вероятностные методы расчёта в современной постановке наиболее разработаны в [481]:

1) надёжность детали как вероятность её безотказной работы (вероятность неразрушения) $r(t)$ в функции срока службы t;

2) вероятность разрушения $V(t)$, связанная с надёжностью зависимостью $V(t) = 1 - r(t)$;

3) плотность вероятностей сроков службы $a(t)$ или плотность распределения частоты разрушений, связанная с вероятностью разрушения зависимостью

$$V(t) = \int_0^\infty a(t)d(t);$$

4) опасность разрушений $\lambda(t)$ как отношение числа вышедших из строя объектов в единицу времени к числу объектов, не имеющих поломок к началу рассматриваемого промежутка времени $\lambda(t) = a(t)/1 - V(t)$.

Анализ расчётов на прочность по критерию опасности разрушений и надёжности основывается на использовании традиционного представления о коэффициенте запаса как отношении фактической прочности к величине действующей нагрузки. Т.к. определение надёжности характеризуется вероятностью разрушения ($V = I - r$), величину коэффициента запаса прочности математически можно связать с опасностью разрушений как функцией, относительное изменение которой во много раз больше, чем относительное изменение функции надёжности.

Таким образом, применение вероятностных представлений позволяет существенно расширить содержание расчётов на прочность благодаря введению в расчёт ряда статистических параметров, более полно раскрывает смысл и структуру запаса прочности, позволяет анализировать значение каждого фактора, влияющего на запас прочности, что имеет практическое значение уже при нынешнем состоянии разработки этих методов расчёта. Расчёт на прочность по критерию опасности разрушений и надёжности делает коэффициент, бывший до этого основной компонентой при оценке прочности, одним из параметров в процессе анализа надёжности. Кроме того, степень достоверности вероятностных расчётов прочности может быть оценена по результатам сравнения рассчитанных надёжностей с фактическими [482], а также путём сравнения коэффициентов запаса, вычисляемых по вероятностным критериям, с установившимися в практике конструирования.

Оценка роли конструктивных и технологических факторов по параметру вероятности разрушения показала существенное влияние последней на величину расчётных характеристик, а в связи с этим и на количественную зависимость запаса прочности от этой вероятности [483]. Считается, что целесообразно выражать условия прочности в вероятностном смысле через максимальные напряжения в зонах концентрации, поставив последние в зависимость от градиента напряжений по сечению с учётом эффекта абсолютных размеров. Соответствующие исследования и методы основывались на рассмотрении статической несущей способности, когда сопротивление деформациям и разрушению определяется распределением и величиной внутренних усилий в элементах конструкции, а также механическими свойствами материала.

Необходимо отметить, что ограниченность данных, необходимых для расчётов на основе статистических характеристик, не позволяет получить систематические данные о запасах прочности в связи с вероятностью разрушения. На базе применяемых методов расчёта на усталость, не основывающихся на вероятностных методах, такая оценка носит значительно более приближённый характер, базируясь на условной корреляции необходимых запасов прочности со статистикой выхода деталей из строя в условиях эксплуатации. Вместе с тем, определение вероятности разрушения дало возможность охарактеризовать необходимый запас прочности и величину допускаемых напряжений в зависимости от дисперсии действующих напряжений [484].

До последнего времени нагрузки при расчете СПМ считались заданными и определялись из опыта эксплуатации аналогичных механизмов или силовых возможностей приводных электродвигателей, т.е. считались детерминированными.

Однако на СПМ действует множество силовых факторов, имеющих случайный характер, который определяется специфическими условиями эксплуатации судна — волнением моря, силой ветра, течением, резкими изменениями температуры окружающей среды, повышенной влажностью, вибрацией и т.п. Поэтому нагрузки, действующие на СПМ, следует отнести к недетерминированным. Такие нагрузки случайны по своей природе и описываются не математическими уравнениями, а при помощи осредненных статистических характеристик.

Как правило, воздействие различных случайных факторов довольно сложно учесть при определении расчетных нагрузок. В результате фактические значения нагрузок почти всегда отличаются от расчетных. Кроме того, влияние случайных факторов на работу СПМ может быть весьма существенным и пренебрежение ими при расчётах недопустимо, т.к. это может сказаться на их работоспособности и надежности. Поэтому практические метода расчета СПМ на прочность должны основываться на вероятностных методах. Вероятностные методы расчета являются в настоящее время наиболее прогрессивными и современными, более точно отражают физические явления, происходящие в СПМ, позволяют более достоверно оценить прочность и надежность конструкции СПМ. К сожалению, эти методы в настоящее время не нашли должного отражения в справочной литературе. Разработки по этому вопросу изложены в специальной литературе и монографиях, не всегда доступных для инженерных работников, занимающихся вопросами прочности и надежности судовых машин и механизмов.

5.5. Рекомендации по расчёту элементов судовых палубных механизмов (СПМ) (специальных лебёдок) МПС

Условия эксплуатации, насыщенность дорогостоящим оборудованием, высокая энерговооруженность, использование сложных морских технологий (позиционирование, бурение, спуско-подъемные операции, работа с забортной аппаратурой) накладывают отпечаток на формирование математических моделей [102, с. 205].

Целью исследования является совершенствование проектирования ГС МПС, основывающееся на совершенствовании существующих методов проектирования ГС МПС путём разработки компьютерных моделей динамики ГС с учётом их эксплуатационных характеристик и позволяющие более правильно и рационально проектировать новые ГС для МПС с необходимыми свойствами и параметрами, а также разработка рекомендаций по прогнозированию возможных эксплуатационных нагрузок для проектирования таких устройств [485].

При проектировании МПС с ГС с использованием разработанных ММ и КМ [391, 392, 460] с их помощью можно проводить модельный эксперимент, не об-

ращаясь к физическому эксперименту. При этом возможно моделирование различных режимов работы проектируемой МПС с ГС, вплоть до экстремальных и аварийных, которые весьма непросто создать в естественных условиях, а иногда это может быть просто опасно для СН МПС, экипажа и персонала и приведёт в лучшем случае к материальным потерям. В данном случае при рассмотрении различных вариантов (режимов) эксплуатации МПС с ГС разрушение ГС, как элемента МПС, будет происходить условно, т.е. в данном случае мы имеем своего рода тренажёр для конструктора-проектировщика [394]. Различные варианты могут записываться и сохраняться. Таким образом создаётся и накапливается база данных различных МПС.

Для расчётов СПМ в данном случае будут использоваться данные о нагрузках, полученных из модельного эксперимента. Тестирование КМ подтвердило хорошую сходимость результатов моделирования и натурных экспериментов [394].

Использование в расчётах коэффициентов запасов прочности базируется на колоссальном опыте расчётов данных механизмов и до определённого времени себя оправдывало. Однако применение завышенных коэффициентов запасов прочности ведёт к увеличению веса СПМ, увеличению их материалоёмкости и в конечном итоге — к удорожанию конструкции СПМ и СН в целом. Причём применение более мощных и тяжёлых конструкций СПМ совершенно не гарантирует их прочность и надёжность: они всё равно выходят из строя и ломаются [457]. На учет конкретных условий эксплуатации и уточнение проблемы внешних сил на базе опыта, эксперимента, научных исследований, обоснованный выбор критериев прочности обращал внимание также В.П. Шостак [102, с. 72]. В штормовых условиях можно работать со спецификационной производительностью, можно ограничить ее или приостановить работы, перейдя к штормовому отстою. При этом не всегда противостояние сильному шторму при выполнении прямой технологической задачи экономически оправдано и тем более, что сильные штормы встречаются относительно редко даже в самых неблагоприятных по погоде районах Мирового океана [102, с. 204]. Как считает В.П. Шостак [102], назначение специфицированных требований к основному оборудованию упомянутых объектов уже на уровне заявок заказчика и технических заданий на разработку становится проектной задачей. Анализируя физические процессы, сопровождающие эксплуатацию в условиях волнения, проектант обязан учесть все его аспекты, включая экстремальные проявления, долговременное распределение и эволюционный характер. В процесс проектирования вовлекаются разработчики головных образцов оборудования, и связанная с этим часть технического задания на судно становится приоритетной.

Естественно, просто так взять и отказаться от используемых и утверждённых методик проектирования СПМ не так просто. Кроме того, они удобны для конструкторов-проектантов. Однако автор, работая в 1985–1992 гг. строителем по общесудовым устройствам (якорно-швартовный комплекс, рулевое устройство, устройства передачи грузов на ходу и т.п.) на заказах пр. 1143.6 (ТАВКР «Варяг») и 1143.7 (ТАВКР «Ульяновск»), общался с конструкторами данных устройств в ПКБ «Прогресс» (г. Николаев) и ПКБ «Невское» (г. Ленинград), участвовал

в совещаниях и организации производства данных устройств. Однако, как ни странно, интересы проектанта, заказчика и производителя СПМ не всегда совпадают, хотя заказчик, естественно, хочет получить надёжный и долговечный СПМ, как и весь корабль в целом. Такая проблема существует, и решить её можно только в содружестве проектанта, заказчика и производителя СПМ. Однако, на наш взгляд, если пионером в данном вопросе выступают научные учреждения и проектант СПМ, заказчик с радостью примет более совершенные СПМ.

Исходя из положений концепции, можно предложить следующую схему совершенствования проектирования МПС с ГС с разделением по этапам.

Этап 1. Определяется тип (вид) МПС. Осуществляется описание процесса функционирования объекта. Создаётся математическая модель функционирования данной МПС. Используется существующий традиционный подход к определению основных параметров и размеров МПС, например, для ПБС: *L, B, H* и другие элементы СН, определяется тип и необходимая длина ГС, исходя из её назначения, формулировка требований к ГС, формулировка ограничений, налагаемых на ГС особенностями морской среды, уточнение конструктивного типа системы, в которой используется ГС, и оценка механических нагрузок, предэскизное и эскизное проектирование ГС, учёт различных ограничений, связанных с проектированием ГС (бюджетные ограничения, ограничения материально-технического характера, разработка мероприятий по материально-техническому обеспечению использования ГС). Оценка финансовых затрат при проектировании ГС. Предэскизное и эскизное проектирование ГС. Рабочее проектирование ГС (учитываются требования теоретических основ методологии проектирования ГС и алгоритма проектирования ГС МПС). Изготовление опытного образца ГС.

В случае использования существующей ГС из имеющихся в производстве осуществляется выбор подходящей по параметрам ГС.

Этап 2. На втором этапе создаются ММ и КМ ГС МПС. Рассматриваются варианты эксплуатации ГС в составе МПС. С помощью КМ осуществляются расчёты режимов функционирования ГС в составе МПС (определяются силы натяжения ГС, действующих на ПА и СН, изменение скорости СН и ПА в процессе их движения).

На основе расчётов нагрузок в ГС формируется база данных возможных режимов нагружения в процессе эксплуатации МПС.

Этап 3. На третьем этапе осуществляется проектирование СПМ на основе рекомендаций по нагрузкам этапа 2. В случае имеющегося в наличии подходящего СПМ осуществляется его выбор.

Этап 4. Окончательное проектирование МПС.

Этап 5. На пятом этапе производится исследование базового варианта МПС, полученной на этапе 4, с позиций надежности основного комплектующего оборудования, определения ее нижнего уровня и влияния на эффективность эксплуатации последующего увеличения.

Этап 6. Рассматривается связь этих качеств с комплектацией и характеристиками оборудования. Критерием оптимизации решений, как и на предыдущих

этапах, служат экономические показатели, определяемые входящей в них стоимостью оборудования, эксплуатационными расходами, объемами и качеством выполненной работы.

Мы считаем, что данные ММ и КМ могут послужить своего рода начальным этапом внедрения усовершенствованных методов проектирования МПС с ГС.

Выводы по Разделу 5

Научная проблема совершенствования проектирования МПС с ГС требует разработки новых методов расчётов и проектирования ГС МПС. Анализ проектных задач при создании МПС (ППС и ПБС) показывает, что значительную теоретическую сложность и наукоёмкость приобретают расчёты ГС МПС, прочности и надёжности их элементов. В связи с этим возникают задачи разработки моделей функционирования МПС в квазистационарных режимах работы, математических моделей динамики МПС, создания комплекса для компьютерного моделирования квазистационарных и динамических режимов работы МПС.

В настоящее время назрела необходимость теоретического обоснования методов проектирования и совершенствования проектных расчётов конструктивных элементов МПС с ГС на основе математических моделей динамических режимов эксплуатации и разработки рекомендаций по прогнозированию возможных нагрузок для проектирования их элементов и комплексов в целом, доведение их до уровня инженерного приложения.

Постоянный рост требований к производительности и качеству подводных поисковых работ требует усовершенствования существующих СМР и создания новых образцов такой техники, которые бы обеспечивали траекторное движение одиночного подводного аппарата (ПА) с высокой точностью и давали возможность организации их группового согласованного подводного движения.

Предложенная методика проектирования МПС с ГС, базирующаяся на математической и компьютерной моделях динамики ГС МПС, позволяет исследовать различные режимы эксплуатации практически всех классов МПС, разработать рекомендации по прогнозированию возможных нагрузок для проектирования их элементов, усовершенствовать существующие методы расчёта и проектирования МПС с ГС и довести их до уровня инженерного приложения.

Научная новизна даннного подхода заключается в совершенствовании методов проектирования ГС и основана на математической модели ГС МПС (с разработкой комплексной компьютерной модели: применении новых методов математического описания), как теоретической основы для разработки высокоэффективных МПС с ГС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итого проведенному исследованию МПС с ГС, автор пришёл к следующим выводам.

1. Значение ГС в жизни человека трудно переоценить. Более того, появление новых задач привело к расширению их применения. Например, при исследовании космического пространства пока не могут обойтись без ГС: оказывается, верхние слои атмосферы удобнее исследовать со спутников с применением ГС (см. [144]). Появление новых конструкционных материалов, развитие технологий, в том числе и ИТ, привело к появлению новых, ранее не существующих ГС. Думаю, что появление ГС вполне можно сравнить с изобретением колеса, при этом их значение для человека не меньше, чем последнего. Несмотря на появление новых типов судов и кораблей, значение ГС не изменилось, их использование значительно расширилось в связи с использованием в ППС и ПБС.

2. Разработанная классификация МПС свидетельствует об их многообразии. Классификация ГС также свидетельствует о широте использования их в МПС. Кроме того, использование ГС в МПС осуществляется на границе двух сред — воздушной и морской, что предъявляет к ним повышенные требования. Однако их многообразие и ограниченный объём данной монографии не позволили рассмотреть подробно все классы существующих МПС. Например, парктически не рассмотрены стационарные МПС. Во всяком случае, в дальнейшем вполне возможно их исследование, особенно в связи с расширением границ их использования на морском шельфе.

3. Математическое описание как статики, так и динамики ГС и МПС в целом свидетельствует о сложности данного процесса. Кроме того, уникальность ГС состоит в самой конструкции: возможность воспринимать растягивающие нагрузки и невозможность воспринимать сжимающие нагрузки также накладывает свои ограничения.

Полученная математическая модель динамики ГС свидетельствует о сложности их описания. Только с помощью компьютерной модели удалось решить данную задачу, и то — с определёнными ограничениями. Более того, разнообразие эксплуатационных задач привело к усложнению и дальнейшему совершенствованию разработанной компьютерной модели описания динамики ГС: при исследовании процесса буксировки вначале в компьютерной модели учитывались 38 параме-

тров, а при исследовании аварийных режимов работы МПС при столкновения ГС с морским объектом в компьютерной модели учитывались уже 67 параметров. Тестирование компьютерной модели показало её хорошую сходимость с ранее проведенными исследованиями. Данная модель позволяет в дальнейшем совершенствовать разработанную математическую модель описания динамики ГС МПС. Однако всему есть предел, недаром А. Эйнштейн говорил: модели должны быть «настолько простыми, насколько это возможно, но не проще» (см. [181, с. 12]).

Разработанная компьютерная модель описания динамики МПС с ГС является мощным средством моделирования различных режимов эксплуатации и может быть чрезвычайно полезной для конструктора и инженера-разработчика МПС. Её использование практически позволяет отказаться от проведения дорогостоящих натурных экспериментов. Автор, участвуя в проведении исследования процессов нагружения траловой лебёдки ЛЭТрС-3 на траулере «Гируляй» в районе акватории п. Клайпеда на Балтийском море, столкнулся со всеми сложностями проведения натурного эксперимента (см. [382]). Данная модель позволяет в комфортных лабораторных условиях моделировать огромное множество эксплуатационных режимов ППС и ПБС.

4. Наиболее опасными режимами эксплуатации МПС являются аварийные. Сложность их моделирования и отсутствие соответствующих моделей свидетельствуют об этом. Аварийные режимы не являются эксплуатационными, однако могут существовать ситуации, когда даже в аварийных ситуациях необходимо продолжать выполнять задачу, например, при проведении траления акватории от мин в условиях ведения боевых действий. Поэтому необходимость создания таких моделей является актуальной. На примере рассмотренных задач (столкновения ГС с ППБО, подводными препятствиями и т.п.) можно говорить об использовании разработанной компьютерной модели для описания аварийных режимов работы МПС на примере ПБС как одних из наиболее нагруженных и широко используемых. Было также исследовано пространственное движение морской привязной системы на примере циркуляции и буёв нейтральной плавучести, проведена оценка дополнительного натяжения буксирного троса при ударе по нему встречного подводного объекта в произвольном месте. В данном случае можно говорить об определённой универсальности полученной компьютерной модели динамики МПС с ГС.

5. Возникновение новых задач в освоении Мирового океана, морей и внутренних водоёмов, совершенствование и развитие МПС требует пересмотра существующих методов расчёта и проектирования МПС с ГС. Каждый вид технических средств освоения океана имеет свои особенности и преимущества. В настоящее время особое внимание уделяется робототехническим морским комплексам (РТК). В настоящее время наметилась тенденция создания и развития новых интегрированных систем противоминной обороны (ПМО), основными компонентами которых являются гидроакустические станции миноискания с антеннами переменной глубины погружения, самоходные искатели-уничтожители мин (СИУМ) и автоматизированные системы управления противоминными дей-

ствиями (АСУ ПМД), изменили взгляды на борьбу с минной опасностью на море, что преобразило облик противоминного контура кораблей. При строительстве перспективных ПМК будут закладываться решения, обеспечивающие реализацию новой концепции борьбы с морскими минами: поиск и их уничтожение впереди по курсу корабля. Интегрированный контур ПМО противоминных кораблей водоизмещением свыше 60 т будет состоять из: ГАСМ, обеспечивающей обнаружение мин на глубинах до 300 м и дальностях 700–1000 м; двух самоходных искателей-уничтожителей мин (СИУМ) с глубиной погружения 200–300 м и скоростью хода 4–6 уз.; автоматизированной системы управления противоминными действиями. В комплекс ПМО предусматривается также включать контактные и неконтактные тралы, отделение пловцов-минеров, устройство позиционирования, позволяющее удерживать корабль в заданном месте с необходимой точностью.

Ознакомление с современным состоянием относительно применения ведущими морскими странами мира безэкипажных средств морской техники (БМС) дает возможность констатировать, что на это время активно разрабатываются новые и совершенствуются существующие автономные и привязные подводные аппараты (ПА), а также создаются безэкипажные малоразмерные надводные суда и беспилотные летательные аппараты морского базирования или применения. Однако, несмотря на появление автономных систем и РТК, ППС и ПБС не потеряли своего значения и в настоящее время, о чём свидетельствует их многообразие.

Вопрос разработки новых образцов подводной техники относится к актуальным вопросам развития Украины как морского государства. Разработку средств морской робототехники (СМР) образовывает отдельная прикладная научная задача, поскольку такие средства обеспечивают высокую производительность выполнения поисковых, геологоразведочных и других морских операций гражданского назначения (см. [455, с. 46]).

Особую актуальность указанное направление развития морской техники имеет для ВМС ВС Украины, где существует ряд задач картографическо-разведывательного, противоминного и поисково-спасательного характера на малых (водолазных) глубинах, а их успешное решение может быть обеспечено созданием и применением современных средств подводной робототехники (см. [455, 456]).

Рост потребности по поиску, инспекции и мониторингу прибрежных зон и акваторий портов требует применения современных технических СМР [456]. По результатам исследований в области создания СМР разного назначения делается вывод о том, что наиболее эффективными для выполнения инспекционных работ являются буксируемые подводные системы (ПБС). Это делает актуальным вывод результатов научной школы украинской робототехники на внутренний и внешний рынки услуг по разработке и созданию конкурентоспособных СМР.

Постоянный рост требований к производительности и качеству подводных поисковых работ требует совершенствования существующих СМР и создания новых образцов такой техники, которые бы обеспечивали траекторное движение одиночного подводного аппарата (ПА) с высокой точностью и давали возможность ор-

ганизации их группового согласованного подводного движения. Необходимость теоретического обоснования методов проектирования МПС с ГС, совершенствования проектных расчётов конструктивных элементов МПС, в том числе и ГС, на основе математических моделей динамических режимов эксплуатации и разработки рекомендаций по прогнозированию возможных нагрузок позволит проектировать их элементы и комплексы в целом, довести их до уровня инженерного приложения.

Такую помощь конструктору-проектанту может оказать разработанные математическая модель описания динамики МПС и компьютерная модель динамики МПС, которые обладают возможностями расчётов параметров практически всех типов МПС, что позволяет их использовать в качестве методики для инженерных расчётов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указ Президента Украины №463/2008 «О решении Совета национальной безопасности и обороны Украины от 16 мая 2008 года «О мерах по обеспечению развития Украины как морского государства» от 20.05.2008 г.

2. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Морської доктрини України на період до 2035 року» за № 1307 від 7 жовтня 2009 р.

3. **Абрамова Н. Т.** Целостность и управление / Н. Т. Абрамова. — М. : Наука, 1974. — 248 с.

4. **Абрамова Н. Т.** Кибернетическая модель и построение теории (с. 168–182). — в кн.: Эксперимент. Модель. Теория [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.

5. **Баженов Л., Бирюков Б., Штофф В.** Моделирование. — В кн.: Филос. энцикл., 1964, т. 3.

6. **Агроник А. Г., Эгенбург Л. И.** Развитие авиационных средств спасения. — М.: Машиностроение, 1990. — 256 с.

7. **Ажажа В. Г.** Дорогами подводных открытий. — М.: Знание, 1977. — 160 с.

8. **Александров М. Н.** Судовые устройства. — Л.: Судостроение, 1968. — 372 с.

9. **Алексеев Н. И.** Статика и установившееся движение гибкой нити. — М.: Лёгкая индустрия, 1970. — 248 с.

10. **Аптер М.** Кибернетика и развитие / М. Аптер. — М.: Мир, 1970. — 216 с.

11. **Берто Г. О.** Океанографические буи: Пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1979. — 215 с. (Серия: «Техника освоения океана»).

12. **Бекерский В. И.** Применение канатов на судах и в портах. — М.: Транспорт, 1986. — 152 с.

13. **Бетман Г.** Грузоподъёмные машины. — Изд. 3-е. / Пер. с 8-го немецкого издания проф. С. Г. Кочергина. — М.: ОНТИ. НКТП СССР, Госмашметиздат, 1933. — 652 с.

14. **Блинцов В. С.** Привязные подводные системы. — Киев: Наукова думка, 1998. — 231 с.

15. **Бобарыков И. И.** Детали машин. Часть общая. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: ОНТИ-НКТП СССР, Гос. научно-техническое изд-во по машиностроению, металлообработке и чёрной металлургии, 1932. — 396 с.

16. **Бугаенко Б. А.** Динамика судовых спуско-подъёмных операций. — Киев: Наукова думка, 2004. — 320 с.

17. **Букштейн М. А.** Производство канатов. — М.: Металлургиздат, 1954. — 124 с.

18. **Букштейн М. А.** Производство стальных и комбинированных канатов, М., 1954. — 148 с.

19. **Букштейн М. А.** Механическое производство канатов и веревок. Ч. 1–2. — М., 1933. — 89 с.

20. **Букштейн М. А.** Прядение лубяных волокон. — Ч. 3 (Прядение жестких лубяных волокон и производство крученых изделий). — М. – Л., 1945 г. — 112 с.

21. **Гёрц Г.** Соотношение между экспериментом, моделью и теорией в процессе естественного познания — с. 5 – 22 / в кн. Эксперимент. Модель. Теория [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.

22. **Гимадиев Р. Ш.** Динамика мягких оболочек парашютного типа. — Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2006. — 208 с.

23. **Глушко М. Ф.** Стальные подъемные канаты. — Киев: Техніка, 1966. — 328 с.

24. **Глушко М. Ф.** Стальные подъемные канаты. — Киев: Техніка, 1976. — 328 с.

25. **Горз Джозеф Н.** Подъём затонувших кораблей: пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1978. — 352 с. (Серия «Техника освоения океана»).

26. **Гутчин И. Б.** Кибернетические модели творчества: Концепция информации и биологические системы / И. Б. Гутчин. — М.: Знание, 1969. — 66 с.

27. **Девнин С. И.** Гидроупругость конструкции при отрывном обтекании. — Л.: Судостроение, 1975. — 192 с.

28. **Дитрих Я.** Проектирование и конструирование: Системный подход / Я. Дитрих : пер. с польск. — М.: Мир, 1981. — 456 с.

29. **Дмитриев А. Н.** Проектирование подводных аппаратов. — Л.: Судостроение, 1978. — 237 с. (Серия «Техника освоения океана»).

30. **Дмитриев А. Н.** Обитаемые подводные аппараты: состояние и перспективы развития — с. 361–378 (в кн.: Проблемы исследования и освоения Мирового океана: под ред. А. И. Вознесенского). — Киев: Наукова думка, 1976. — 373 с.

31. **Доусон Т.** Проектирование сооружений морского шельфа: пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1986. — 288 с. (Серия «Техника освоения океана»).

32. **Зайчик К. С.** Промысловые устройства морских рыболовных судов. — Л.: Судостроение, 1972. — 232 с.

33. **Истошин С. Ю.** Морской горный промысел. — М.: Наука, 1981. — 168 с.

34. **Казаков В. Б.** Боевые аэросцепки. Серия «Молодёжи — о Вооружённых силах». — М.: изд-во ДОСААФ СССР, 1988. — 149 с.

35. **Казменко В. Д.** Тросы для морской буксировки. — М.: Морской транспорт, 1958. — 92 с.

36. **Казменко В. Д.** Стальной канат. Прочность и ресурс. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1983. — 72 с.

37. **Калиткин Н. Н.** Численные методы. — М., Наука, 1978. — 512 с.

38. **Капитанец И. М.** Битва за мировой океан в «холодной» и будущих войнах. — М.: Вече, 2002. — 544 с. (серия «Военные тайны XX века).

39. **Качурин В. К.** Теория висячих систем / В. К. Качурин. — Л., 1962. — 223 с.

40. **Квейд Э.** Анализ сложных систем. М.: Изд-во «Советское радио», 1969. — 243 с. (с. 12 – 14).

41. **Кенни Дж. Е.** Техника освоения морских глубин: Пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1977. — 312 с. (Серия «Техника освоения океана»).

42. **Кирпичёв М. В.** Теория подобия как основа эксперимента / М. В. Кирпичёв // Юбил. школа. Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. — 1945. — № 4–5. — С. 333–338.

43. **Кирпичёв М.В.** Теория подобия / М.В. Кирпичёв. — М.: Изд-во АН СССР, 1953. — 95 с.

44. **Клаус Г.** Кибернетика и общество / Г. Клаус. — М.: Прогресс, 1967. — 432 с.

45. **Клейтон, Б.** Механика морских судов / Б. Клейтон, Р. Бишоп: Пер. с англ. Казменко В.Д. — Л.: Судостроение, 1986. — 436 с.

46. **Колчин А.И.** Стальные канаты. — М.: Машгиз, 1950. — 136 с.

47. **Короткин И.М.** Аварии и катастрофы кораблей. — Л.: Судостроение, 1977. — 296 с.

48. **Кроми У.** Обитатели бездны. [Текст] / У. Кроми: под ред. Л.А. Зельманова. — Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1971. — 343 с.

49. **Крючков Ю.С.** Подводные лодки и их создатели: 1900–2000 гг. Драмы людей, кораблей и идей / Ю.С. Крючков. — Николаев: издательство Торубары Е.С.; издательство «Наваль», 2010. — 512 с.

50. **Крючков Ю.С.** Призраки в царстве Нептуна / Ю.С. Крючков. — Николаев: el Talisman / ЧП Торубара Е.С., 2008. — 264 с.

51. **Кульмач П.П.** Гидродинамика гидротехнических сооружений / П.П. Кульмач. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 193 с.

52. **Кульмач П.П.** Сейсмостойкость портовых гидротехнических сооружений / П.П. Кульмач. — М.: Транспорт, 1970. — 312 с.

53. **Кульмач П.П.** Якорные системы удержания плавучих объектов (Вопросы статики и динамики плавучих сооружений на якорях). — Л.: Судостроение, 1980. — 336 с. (Серия «Техника освоения океана»).

54. **Лаппо Д.Д.** Силовое воздействие гравитационных волн при обтекании гидротехнических сооружении / Д.Д. Лаппо. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 116 с.

55. **Литвин О.Б.** Ацетилцеллюлоза и ацетатный шелк. — М., 1937. — 93 с.

56. **Лукошков А.В.** Техника исследования морского дна. — Л.: Судостроение, 1984. — 264 с. (Серия «Техника освоения океана»).

57. **Лызлов Н.А.** Крученые изделия. Канаты, веревки, шпагат, рыболовные нитки. — Л.–М., 1935. — 87 с.

58. **Магула В.Э.** Судовые эластичные конструкции. — Л.: Судостроение, 1978. — 263 с.

59. **Македон Ю.А.** Проектирование в судостроении [Текст] / Ю.А. Македон. — Л.: Судостроение, 1980. — 280 с.

60. **Марквардт К.Х.** Рангоут, такелаж и паруса судов XVIII века: Пер. с нем. — Л.: Судостроение, 1991. — 288 с.

61. **Меркин Д.Р.** Введение в теорию устойчивости движения. — М.: Наука, 1976. — 319 с.

62. **Меркин Д.Р.** Введение в механику гибкой нити. / Д.Р. Меркин. — М.: Наука, 1980. — 240 с.

63. **Милн П.** Подводные инженерные исследования. Пер. с англ.. — Л.: Судостроение, 1984. — 344 с. (Серия «Техника освоения океана»).

64. **Медведев Н.Ф.** Суда для исследования Мирового океана. — Л.: Судостроение, 1971. — 216 с.

65. **Милсум Дж.** Анализ биологических систем управления / Дж. Милсум. — М., 1968. — 502 с.

66. **Нарусбаев А.А.** Катастрофы в морских глубинах. 2-е изд. — Л.: Судостроение, 1989. — 112 с.

67. Необитаемые подводные аппараты / Под общ. ред. А. В. Сытина. — М.: Воениздат, 1975. — 159 с.

68. **Молчанов В. А.** Возвращение из глубин. — Л.: Судостроение, 1982. — 184 с. — (Серия «Техника освоения океана»).

69. **Новиков А. И.** Океанотехника прошлого и настоящего / А. И. Новиков, В. А. Андреев, Ю. Д. Федотов (под ред. А. И. Новикова). — Севастополь: издатель Кручинин Л. Ю., 2007. — 256 с.

70. **Новик И. Б.** Моделирование и его роль в естествознании и технике / И. Б. Новик // Диалектика в науках и неживой природе. — М., 1964. — 213 с.

71. **Ногид Л. М.** Теория подобия и размерностей / Л. М. Ногид. — Л.: Судпромгиз, 1959. — 98 с.

72. **Озерецковский О. И.** Действие взрыва на подводные объекты / О. И. Озерецковский; под ред. Е. С. Шахиджанова. — М.: ФГУП ЦНИИХМ, 2007. — 262 с.

73. **Пакшвер А. Б.** Технология мелно-аммиачного шелка. — М. – Л.: 1947. — 56 с.

74. **Парин Н. В.** Рыбы открытого океана / Отв. ред. и авт. предисл. А. П. Андрияшев. — М.: Наука, 1988. — 272 с.

75. **Пирумов У. Г.** Численные методы. — М.: Дрофа, 2004. — 224 с.

76. **Работнов Ю. Н.** Сопротивление материалов. — М.: Физматгиз. 1962. — 456 с.

77. **Рашевский П. К.** Курс дифференциальной геометрии. — М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. — 428 с.

78. **Рижева Н. О.** Історія суднобудування на теренах України (від давніх до новітніх часів). — К.: ПП Сергійчук М. І., 2008. — 476 с.

79. **Рыбаков Б. А.** Очерки по истории русской деревни X – XII вв. / Под ред. Рыбакова Б. А. — Вып. 32. — М.: Гос. изд. культпросвет, лит-ры, 1956. — С. 103.

80. **Роговин З. А.** Химия и технология производства вискозного волокна. — М., 1940. — 58 с.

81. **Розенштейн М. М.** Расчёт элементов глубоководной траловой системы. — М.: Пищевая промышленность, 1976. — 248 с.

82. **Роуч П.** Вычислительная гидродинамика. — М.: Мир, 1980. — 618 с.

83. **Рябинин И. А.** Надёжность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. — СПб: Изд-во СПбГУ, 2007. — 248 с.

84. **Савин Г. Н.** Динамическая теория расчёта шахтных подъёмных канатов. — Изд-во АН УССР, 1949. — 67 с.

85. **Салтанов Н. В.** Гибкие нити в потоках. Монография. АН УССР, Институт гидромеханики. — К.: Наукова думка, 1974. — 140 с.

86. **Светлицкий В. А.** Механика гибких стержней и нитей. — М.: Машиностроение, 1978. — 222 с.

87. **Светлицкий В. А.** Механика трубопроводов и шлангов: Задачи взаимодействия стержней с потоком жидкости или воздуха. — М.: Машиностроение, 1982. — 280 с. (Библиотека расчётчика).

88. **Светлицкий В. А.** Механика абсолютно гибких нитей / В.А. Светлицкий. — М.: Изд-во МАИ, 2001. — 432 с.

89. **Сидорченко В. Ф.** Морские буксиры и их операции. — Л.: Судостроение, 1986. — 240 с.

90. **Солодухин Ю. К.** Логический анализ понятия закона науки. — С. 26 – 28 (в кн.: Эксперимент. Модель. Теория. [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.).

91. **Тарасюк Ю.Ф.** Международные океанографические экспедиции. — С. 30–40 (в кн.: Человек, море, техника: Сборник. — Л.: Судостроение, 1980. — 280 с.)

92. **Трунин С.Ф.** Траловые лебёдки. — Л.: Судостроение, 1979. — 84 с.

93. **Уемов А.И.** Логические основы метода моделирования / А. И. Уемов. — М.: Мысль, 1971. — 311 с.

94. **Украинцев Б.С.** Отображение в неживой природе / Б.С. Украинцев. — М.: Мир, 1969. — 212 с.

95. **Уо Ж.** 20 лет в батискафе / Ж. Уо. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976. — 176 с.

96. **Фонарёв А.Л.** Гидромеханика тралов. — М.: Колос-Пресс, 2002. — 115 с.

97. **Фридман А.Л.** Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства. — М.: Лёгкая и пищевая пром-сть, 1981. — 328 с.

98. **Хаукс Герхард.** Подводная техника: Пер. с нем. — Л.: Судостроение, 1979. — 288 с. (Серия «Техника освоения океана»).

99. **Шанников В.М.** Грузоподъёмные механизмы. — М.: ОНТИ. НКТП СССР, Госмашметиздат, 1933. — 228 с.

100. **Шехватов Б.В.** Океанографические буи и буйковые лаборатории. — С. 183–204. (В кн.: Проблемы исследования и освоения Мирового океана. Под ред. А.И. Вознесенского. — Киев: Наукова думка, 1976. — 373 с.).

101. **Шкинев А.Н.** Аварии в строительстве. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1984. — 320 с.

102. **Шостак В.П.** Эффективность техники освоения океана. Направления проектных исследований. — К.: Наукова думка, 2002. — 319 с.

103. Электронное моделирование и машинное управление в экономике. — М.: Мир, 1965. — 305 с.

104. **Яковлев Д.Я.** Неожиданные атаки / Д. Я. Яковлев. — С. 212–221 (В кн.: Человек, море, техника — 88: Сб. ст. — Вып. 5. — Л.: Судостроение, 1988. — 376 с.).

105. **Ястребов В.С.** Необитаемые подводные аппараты: состояние и перспективы развития. — С. 323–342 (В кн.: Проблемы исследования и освоения Мирового океана. Под ред. А.И. Вознесенского. — Киев: Наукова думка, 1976. — 373 с.).

106. **Ястребов В.С.** Подводные роботы / Под общей редакцией В.С. Ястребова. — Л.: Судостроение, 1977. — 368 с.

107. **Ястребов В.С.** Методы и технические средства океанологии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 271 с.

108. Автоматизированные системы с буксируемыми приборами в океанологических исследованиях / В.А. Гайский, Ю.Г. Артёмов, В.А. Блинков и др. — Киев: Наукова думка, 1987. — 176 с.

109. Автоматические подводные аппараты / Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселёв Л.В. и др. — Л.: Судостроение, 1981. — 224 с. (Серия «Техника освоения океана»).

110. **Агеев М.Д., Наумов Л.А., Илларионов Г.Ю. и др.** Необитаемые подводные аппараты военного назначения / Под ред. акад. М.Д. Агеева. Монография. — Владивосток: Дальнаука, 2005. — 168 с.

111. **Алабужев П.М., Геронимус В.Б., Минкевич Л.М., Шеховцов Б.А.** Теория подобия и размерностей: Моделирование. — М.: Высшая школа, 1968. — 208 с.

112. **Александров В.В.** Алгоритмы и программы структурного метода обработки данных / В.В. Александров, Н.Д. Горский. — Ленинград: Наука, Ленинградское отделение, 1983. — 308 с.

113. Алгоритмы оптимизации проектных решений / Под ред. А.И. Половинкина. — М.: «Энергия», 1976. — 264 с.

114. Алгоритмы обработки экспериментальных данных / Ответственный редактор доктор технических наук И.А. Овсеевич, Институт проблем передачи информации АН СССР. — Москва: Наука, 1986. — 172 с.

115. Алгоритмы расчета стальных конструкций / Е.В. Горохов, В.Ф. Мущанов, А.М. Югов и др. / Под ред. Е.В. Горохова. — М.: Стройиздат, 1989. — 368 с.

116. **Альтшуль Б.А., Фридман А.Л.** Динамика траловой системы. — М.: Агропромиздат, 1990. — 237 с.

117. **Арие М.Я., Полянкер А.Г.** Дирижабль нового поколения. — К.: Наукова думка, 1983. — 173 с.

118. **Арутюнян Н.Х., Абрамян Б.Л.** Кручение упругих тел. — М.: Физматгиз, 1963. — 163 с.

119. **Батуев Г.С.** Инженерные методы исследования ударных процессов / Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков, А.К. Ефремов, А.А. Федосов. — М.: Машиностроение, 1977. — 240 с.

120. **Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С.** Теоретическая механика в примерах и задачах. Т. 2. — М.: Наука, 1966. — 664 с.

121. **Белов В.А., Коротков В.А., Соврасов В.К., Шимянский Л.** Буксируемые орудия лова. — М.: Агропромиздат, 1987. — 200 с.

122. **Блинцов В.С., Магула В.Э.** Проектирование самоходных привязных подводных систем. — К.: Наукова думка, 1997. — 139 с.

123. **Боголюбский В.И., Голубев И.М., Амитин И.И.** Проволочные канаты. — М., 1950. — 92 с.

124. **Боровиков П.А., Самарский В.Н.** Подводная техника морских нефтепромыслов. — Л.: Судостроение, 1980. — 176 с. (Серия «Техника освоения океана»).

125. **Бугаенко Б.А. и др.** Судовые спуско-подъёмные устройства. — Л.: Судостроение, 1980. — 173 с.

126. **Бутусов М.М., Галкин С.Л., Тарасюк Ю.Ф.** Волоконная оптика в морском приборостроении. — С. 189–195 / Человек, море, техника. — Л.: Судостроение, 1987. — Вып. 4. — 234 с.

127. **Виноградов, Н.И.** Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики / Н.И. Виноградов, М.Л. Гутман, И.Г. Лев, М.З. Нисневич — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2000. — 324 с.

128. **Габрюк В.И., Кулагин В.Д.** Механика орудий рыболовства и АРМ промысловика. — М.: Колос, 2000. — 416 с.

129. **Гаррет Р.** Основы анализа операций на море / Р. Гаррет, Дж. Лондон. — М.: Воениздат, 1974. — 270 с.

130. **Глиненко Л.К., Смердов А.А., Выборщик О.М.** Моделирование эвристических задач проектирования. — Львов: Телемаркет, 1986. — 234 с.

131. **Глушко М.Ф., Скалацкий В.К., Шилин И.А.** Эволюция и перспективы развития технологи производства стальних канатов. — С. 94–101 (В кн.: Стальне канаты. Сборник статей. Вып. 5 / Под ред. д.т.н. Глушко М.Ф. Т. 5. — К.: Изд. «Техника», 1968. — 334 с.).

132. **Годунов С.К.** Разностные схемы / С.К. Годунов, В.С. Рябенький. — М.: Наука, 1977. — 440 с.

133. Дари лісів / Ю.Я. Єлін, М.Я. Зерова, М.І. Лушпа, С.І. Шабарова. — 4-е вид., доп. і перероб. — К.: Урожай, 1987. — 304 с.

134. **Дёллинг Э.** Философско-логические проблемы построения теорий. — С. 252 – 265 (в кн.: Эксперимент. Модель. Теория. [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.).

135. **Джерман К., Бивис Б.** Современный трос в морской практике: Пер с англ. — Л.: Судостроение, 1980. — 93 с.

136. Динамика подводных буксируемых систем / Поддубный В.И., Шамарин Ю.Е., Черненко Д.А., Астахов Л.С. — СПб: Судостроение, 1995. — 200 с.

137. Динамика подводных океанографических систем / Шамарин Ю.Е., Поддубный В.И., Богатов Л.И., Сидорский С.В., Макаренко А.И. — Киев, 2001. — 228 с.

138. **Дмитриев А.Н., Диомидов М.Н.** Разведчики океанских глубин. — Л.: Судостроение, 1968. — 216 с.

139. **Дмитриев А.Н. и др.** Подводные разведчики: рыбопромысловый подводный флот / А.Н. Дмитриев, М.Л. Зеферман, В.И. Неретин. — Л.: Судостроение, 1984. — 168 с.

140. **Допатка Р., Перепечко А.** Книга о судах / Пер. с нем. — Л.: Судостроение, 1981. — 208 с.

141. **Дружинин А.Д., Пшеничный Б.П.** Некоторые проблемы глубоководного рыбного промысла. — С. 315 – 320 (в кн.: Проблемы исследования и освоения Мирового океана / Под ред.. д-ра техн. наук А.И. Вознесенского. — Л.: Судостроение, 1979. — 407 с. (Серия «Техника освоения океана»)).

142. **Житков Д.Г., Поспехов И.Т.** Стальные канаты для подъемно-транспортных машин. — М.: Машиностроение, 1953. — 148 с.

143. **Жуков Р.Ф. и др.** Системы, приборы и устройства подводного поиска. — М.: Воениздат, 1972. — 105 с.

144. **Иванов В.А., Ситарский Ю.С.** Динамика полёта систем гибко связанных космических объектов. — М.: Машиностроение, 1986. — 248 с.

145. **Иконников И.Б., Гаврилов В.М., Пузырев Г.В.** Подводные буксируемые системы и буи нейтральной плавучести. — СПб.: Судостроение, 1992. — 224 с. (Серия «Техника освоения океана»).

146. **Касьяненко А.А., Михайличенко К.Ю.** Анализ риска аварий техногенных систем: Монография. — М.: РУДН, 2009. — 176 с.

147. **Катанович А.А., Хайзерук Е.М.** Суда для прокладки подводных кабелей связи. — Л.: Судостроение, 1988. — 152 с.

148. **Клейтон Б., Бишоп Р.** Механика морских судов: Пер с англ. — Л.: Судостроение, 1986. — 436 с.

149. **Кондратович А.А., Пиянзов Г.Г.** Противоминное оружие. — М.: Воениздат, 1989. — 88 с.

150. **Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Чупина К.В.** Системы управления глубиной погружения буксируемых объектов: монография. — Владивосток: Дальнаука, 2005. — 285 с.

151. **Лаврентьев М.А., Шабот Б.В.** Проблемы гидродинамики и их математические модели. — М.: Наука, 1977. — 407 с.

152. **Левин В.Е.** Механика деформирования криволинейных стержней: монография / В.Е. Левин, Н.В. Пустовой. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. — 208 с. (Серия «Монография НГТУ»).

153. **Налимов В.В., Голикова Т.И.** Логические основания планирования эксперимента. — М.: Наука, 1976. — 348 с.

154. Основы механики нити / Ю.В. Якубовский, В.С. Живов, Я.И. Коритысский, И.И. Мигушов. — М.: Лёгкая индустрия, 1973. — 271 с.

155. **Пакшвер А.Б., Чачхиани А.Б.** Оборудование фабрик вискозного волокна. — М.: Лёгкая индустрия, 1940. — 68 с.

156. Подводная технология / Коробков В.А., Левин В.С., Лукошков А.В., Серебрениц-кий П.П. — Л.: Судостроение, 1981. — 240 с. (Серия «Техника освоения океана»).

157. **Блінцов В.С., Блінцов О.В.** Протимінні прив'язні підводні апарати і системи: Наукова монографія. — Миколаїв: НУК, 2015. — 268 с.

158. Подъёмно-транспортные машины и палубные механизмы / Камнев Г.Ф., Кипар-ский Г.Р., Балин В.М. — Л.: Судостроение, 1976. — 312 с.

159. Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики / Вино-градов Н.И., Гутман М.Л., Лев И.Г., Нисневич М.З.— СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2000. — 324 с.

160. Принципы построения технических средств исследования океана / Отв. ред.: д.т.н. В.С. Ястребов. — М.: Наука, 1982. — 325 с.

161. Проблемы гидродинамики и их математические модели / Лаврентьев М.А., Ша-бат Б.В. — Изд. 2-е. — М.: Главная редакция физико-математической литературы изда-тельства «Наука», 1977. — 408 с.

162. Проблемы исследования и освоения Мирового океана / Под ред. А.И. Вознесен-ского. — Киев: Наукова думка, 1976. — 373 с.

163. Проблемы исследования и освоения Мирового океана / Под ред. д-ра техн. наук А.И. Вознесенского. — Л.: Судостроение, 1979. — 407 с. (Серия «Техника освоения океа-на»).

164. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в морях и океанах / Под редакцией Е.С. Нестерова. — М.: РОСГИДРОМЕТ, 2013. — 337с.

165. **Савин Г.Н., Глушко М.Ф.** О строительной механике стальных подъёмных кана-тов. — С. 7–27 (В кн. Стальные канаты: Сборник статей / Под ред. д-ра техн. наук Глуш-ко М.Ф., Т. 1. — К.: Техника, 1964. — 308 с.).

166. **Савин Г.Н., Горошко О.А.** Динамика нити переменной длины. — Киев: Наукова думка, 1962. — 332 с.

167. **Сальников С.С., Слевич С.Б.** Хозяйственное освоение ресурсов океана. — С. 235–247 (В кн.: Проблемы исследования и освоения Мирового океана / Под ред. д-ра техн. наук А.И. Вознесенского. — Л.: Судостроение, 1979. — 407 с. (Серия «Техника осво-ения океана»)).

168. **Чус А.В., Донченко В.Н.** Основы технического творчества. — Киев – Донецк: Вища школа, 1983. — 184 с.

169. **Юрнев А.П.** Аварии под водой / А.П. Юрнев, Б.Д. Сахаров, А.В. Сытин. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1986. — 128 с.

170. **Якубовский Ю.В., Живов Я.И. и др.** Основы механики нити. — М.: Легкая индустрия, 1973. — 271 с.

171. **Блінцов В.С., Магула В.Є.** Проектний розрахунок зусиль у кабель-тросі прив'язної підводної системи: Навчальний посібник. — Миколаїв: УДМТУ, 1998. — 43 с.

172. **Бугаенко Б.А., Магула В.Э.** Специальные судовые устройства: Учебное посо-бие. — Л.: Судостроение, 1983. — 392 с.

173. **Гліненко Л.К., Смердов А.А.** Технологія інженерного проектування: структур-ний синтез технічних та біотехнічних систем: Навч. посібник. — Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. — 388 с.

174. **Годунов С.К.** Лекции по современным аспектам линейной алгебры / С.К. Годунов. — Новосибирск: Науч. книга, 2002. — 216 с.

175. **Градштейн И.С., Рыжик И.М.** Таблицы интегралов сумм, рядов и произведений. — М.: Наука, 1971. — 118 с.

176. **Егоров В.И.** Подводные буксируемые системы: Учебное пособие. — Л.: Судостроение, 1981. — 304 с.

177. **Жданов Л.Б.** Полная энциклопедия кораблей и судов: Справочное издание / Л.Б. Жданов. — М.: МОРКНИГА, 2009. — 312 с.

178. **Ковалев Н.Е., Шевчук Л.Д., Щуренко О.И.** Биология: Пособие для подгот. отд. мед. ин-тов / Под общей ред. Н.Е. Ковалёва. — М.: Высш. шк., 1986. — 384 с.

179. **Косенков В.М.** Краткий курс лекций по численным методам: Учебное пособие / В.М. Косенков. — Николаев: Издательство НУК, 2012. — 73 с.

180. **Лебедев Н.Н., Скальская И.П., Уфлянд Я.С.** Сборник задач по математической физике. — М.: Гос. изд-во тех.-теор. лит., 1954. — 420 с.

181. **Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А.** Эконометрика. Начальный курс. — М.: Дело, 1997. — 248 с.

182. **Мартыненко В.С.** Операционное исчисление: Учеб. пособие. — 4-е изд., перераб. и доп. — К.: Вища школа, 1990. — 359 с.

183. Морское дело: Учебник / Под ред. А.И. Щетининой. — Л: Транспорт, 1971. — 825 с.

184. **Мыльник В.В., Титаренко Б.П., Волочиенко В.А.** Исследование систем управления: Учебное пособие для вузов. — 3-е изд. — М.: Академический Проект; Трикста. — 2004. — 352 с.

185. **Светлицкий В.А., Стасенко И.В.** Сборник задач по теории колебаний. — М.: Высшая школа, 1973. — 454 с.

186. Судовые устройства: Учебник / Александров М.Н., Жуков Ю.Д., Симоненко А.С., Смирнов Ю.А. и др. — Л.: Судостроение, 1982. — 320 с.

187. **Тарасик В.П.** Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. — Мн.: Дизайн про, 2004. — 640 с.

188. **Тронин Ю.Н., Масленченков Ю.С.** Управленческие решения: Учебное пособие для вузов. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. — 310 с.

189. **Шишов Ю.В.** Основы промышленного рыболовства: Конспект лекций. — Керчь: КГМТУ, 2010. — 54 с.

190. **Букштейн М.А.** Стальные канаты: Справочное руководство. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М.: Гос. научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1961. — 175 с.

191. **Ильин В.Е.** Подводные лодки России: иллюстрированный справочник / В.Е. Ильин, А.И. Колесников. — М.: ООО «Издательство Астрель», 2001. — 288 с.

192. **Лобанов В.А.** Справочник по технике освоения шельфа. — Л.: Судостроение, 1983. — 288 с. (Серия «Техника освоения океана»).

193. Морской энциклопедический справочник: В двух томах. Том 1 / Под ред. Н.Н. Исанина. — Л.: Судостроение, 1986. — 512 с.

194. Морской энциклопедический справочник: В двух томах. Том 2 / Под ред. Н.Н. Исанина. — Л.: Судостроение, 1986. — 520 с.

195. Передача грузов в море: Справочник / Горшков И.А., Махорин Н.И. — Л.: Судостроение, 1977. — 256 с.

196. **Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.** Справочник по сопротивлению материалов. — Киев: Наук. думка, 1988. — 736 с.

197. **Пошерстник, М.Ю.** Справочник по судовым кабелям и проводам / М.Ю. Пошерстник, М.А. Салютина. — Л.: Судостроение, 1966. — 252 с.

198. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трёх томах. Том 1. Под ред. д-ра техн. наук проф. И.А. Биргера и чл.-кор. АН Латвийской ССР Я.Г. Пановко. — М.: Машиностроение, 1988. — 820 с.

199. **Свенсон С.** Справочник по такелажным работам / Пер. со швед. — Л.: Судостроение, 1987. — 168 с.

200. Системы и элементы глубоководной техники подводных исследований: Справочник / В.С. Ястребов, Г.П. Соболев, А.В. Смирнов и др. — Л.: Судостроение, 1981. — 304 с.

201. Судовые устройства: Справочник / Под ред. М.Н. Александрова. — Л.: Судостроение, 1987. — 656 с.

202. Судовые устройства: Справочник для конструкторов и проектировщиков / Гурович А.Н., Родионов А.А., Асиновский В.И., Гринберг Д.А. — Л.: Судостроение, 1967. — 412 с.

203. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие / Касаткин Б.С., Кудрин А.Б., Лобанов Л.М. и др. / Отв. ред. Б.С. Касаткин. — К.: Наукова думка, 1981. — 583 с.

204. Военный энциклопедический словарь. — М.: Издательский дом «ОНИКС 21 век», 2002. — 1432 с.

205. **Загнітко А.П., Щукіна І.А.** Великий тлумачний словник. Сучасна українська мова. — Донецьк: ТОВ ВКФ «БАО», 2008. — 704 с.

206. Морской энциклопедический словарь: В трёх томах. Том 1 / Под ред. В.В. Дмитриева. — Л.: Судостроение, 1991. — 504 с.

207. Словарь иностранных слов. — 18-е изд., стер. — М.: Рус. яз., 1989. — 624 с.

208. Словарь по кибернетике / Под ред. академика В.С. Михалевича. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — Киев: Главная редакция Украинской Советской Энциклопедии имени М.П. Бажана, 1989. — 751 с.

209. Энциклопедический словарь, Т. 1 (А–К) / Гл. редактор Б.А. Введенский. — М.: Государственное научное издательство «Большая советская энциклопедия», 1953. — 720 с.

210. Большая советская энциклопедия. Т. 9 / Гл. редактор Б.А. Введенский. — 2-е изд. — М.: Государственное научное издательство «Большая советская энциклопедия», 1952. — 624 с.

211. Большая советская энциклопедия. Т. 19 / Гл. редактор Б.А. Введенский. — 2-е изд. — М.: Государственное научное издательство «Большая советская энциклопедия», 1954. — 608 с.

212. Большая советская энциклопедия. Т. 21. — 2-е изд. — М.: Гос. научное изд-во «Большая советская энциклопедия», 1953. — 628 с.

213. Большая советская энциклопедия. Т. 22 / Гл. редактор Б.А. Введенский. — 2-е изд. — М.: Государственное научное издательство «Большая советская энциклопедия», 1953. — 628 с.

214. Большая советская энциклопедия. Т. 25 / Гл. редактор Б.А. Введенский. — 2-е изд. — М.: Государственное научное издательство «Большая советская энциклопедия», 1954. — 632 с.

215. Большая советская энциклопедия. Т. 26 / Гл. редактор Б. А. Введенский. — 2-е изд. — М.: Государственное научное издательство «Большая советская энциклопедия», 1954. — 652 с.

216. Большая советская энциклопедия. Т. 30 / Гл. редактор Б. А. Введенский. — 2-е изд. — М.: Государственное научное издательство «Большая советская энциклопедия», 1954. — 656 с.

217. Большая советская энциклопедия. Т. 32 / Гл. редактор Б. А. Введенский. — 2-е изд. — М.: Государственное научное издательство «Большая советская энциклопедия», 1955. — 648 с.

218. Большая советская энциклопедия. Т. 40 / Гл. редактор Б. А. Введенский. — 2-е изд. — М.: Государственное научное издательство «Большая советская энциклопедия», 1957. — 648 с.

219. Большая Советская Энциклопедия, Т. 1. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1970. — 607 с.

220. Большая Советская Энциклопедия, Т. 2. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1970. — 631 с.

221. Большая Советская Энциклопедия, Т. 3. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1970. — 623 с.

222. Большая Советская Энциклопедия, Т. 5. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1971. — 639 с.

223. Большая Советская Энциклопедия, Т. 8. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1972. — 591 с.

224. Большая Советская Энциклопедия, Т. 11. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1973. — 607 с.

225. Большая Советская Энциклопедия, Т. 12. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1973. — 623 с.

226. Большая Советская Энциклопедия, Т. 13. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1973. — 608 с.

227. Большая Советская Энциклопедия, Т. 14. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1973. — 623 с.

228. Большая Советская Энциклопедия, Т. 15. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1974. — 631 с.

229. Большая Советская Энциклопедия, Т. 19. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1975. — 646 с.

230. Большая Советская Энциклопедия, Т. 20. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1975. — 607 с.

231. Большая Советская Энциклопедия, Т. 26. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1977. — 622 с.

232. Большая Советская Энциклопедия, Т. 27. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1977. — 622 с.

233. Большая Советская Энциклопедия, Т. 28. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1978. — 615 с.

234. Большая Советская Энциклопедия, Т. 29. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1978. — 639 с.

235. Большая Советская Энциклопедия, Т. 30. — 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Издательствово «Советская энциклопедия», 1978. — 631 с.

236. Детская энциклопедия (для среднего и старшего возраста), Т. 6. Растения и животные. — 2-е изд., Академия пед. наук. — М.: Просвещение, 1965. — 527 с.

237. **Курти О.** Постройка моделей судов. Эциклопедия судомоделизма / Сокращённый пер. с итал. — Л.: Судостроение, 1977. — 544 с.

238. ДСТУ ISO 2307-2001. Канати і мотузки. Метод визначення певних фізичних та механічних властивостей.

239. ДСТУ ISO 2307-2001. Канати і мотузки. Метод визначення певних фізичних та механічних властивостей. — 2003. — Введ. 2003.01.07. — Київ: Держспоживстандарт України, 2003. — 9 с.

240. ДСТУ ISO 1140-2003. Канати поліамідні. Технічні умови. — 2004. — Введ. 2004.01.10. — Київ: Держспоживстандарт України, 2004. — 8 с.

241. ДСТУ ISO 1140-2003. Канати поліефірні. Технічні умови. — 2004. — Введ. 2004.01.10. — Київ: Держспоживстандарт України, 2004. — 8 с.

242. ДСТУ ISO 1346-2003. Канати поліпропіленові. Технічні умови. — 2004. — Введ. 2004.01.10. — Київ: Держспоживстандарт України, 2004. — 10 с.

243. ДСТУ ISO 1969-2003. Канати поліетиленові. Технічні умови. — 2004. — Введ. 2004.01.10. — Київ: Держспоживстандарт України, 2004. — 8 с.

244. ГОСТ 11914-66. Канаты пенька-сталь — не действует.

245. ГОСТ 1088-70. «Манильские тросы» — не действует.

246. ГОСТ 1088-71. Канаты сизальские. Технические условия — не действует.

247. ГОСТ 1091. Лини — не действует.

248. ГОСТ 30055-93. Канаты из полимерных материалов и комбинированные. Технические условия. — 1994. — Введ. 1995.01.01. — М.: Изд-во стандартов, 1994. — 42 с.

249. ГОСТ 30055-93. Канаты из полимерных материалов и комбинированные. Технические условия.

250. **Абдулов К., Тюрин Б.** Морские тральщики проекта 266МЭ // Военный парад. — Май-июнь. — 1995. — С. 92–94, 155–156.

251. Автономные подводные роботы для глубоководных исследований // Судостроение. — 1990. — №12. — С. 4–8.

252. **Агишев Е.Р., Крутиков А.В., Ерпулёв М.А., Кайфаджян А.А.** Направления развития обитаемых привязных подводных аппаратов // Судостроение. — 1997. — №4. — С. 22–27.

253. **Алексеев Ю.** Авиационная выставка «Фарнборо-82» / Зарубежное военное обозрение. — №4. — 1983. — С. 47–52 (Дирижабль «Скайшип-600» — С. 50).

254. **Андреев М., Клюшин В., Охрименко С., Ложкин Д.** Малогабаритная низкочастотная гидроакустическая станция с гибкой протяжённой буксируемой антенной для подводных лодок // Морской сборник. — 2008. — №8. — С. 59–61.

255. **Артемьев А.** Морские вертолёты // Техника и вооружение: вчера, сегодня, завтра. — 2001. — №8. — 48 с. (С. 37–42).

256. **Артемьев А.** Крылья над морем (хроники морской авиации). К 90-летию морской авиации России // Авиация и космонавтика: вчера, сегодня, завтра. — 2007. — №4. — С. 1–5.

257. **Барченков С.** Электроника в освоении океана / С. Барченков // Зарубежное военное обозрение. — №8. — 1973. — С. 64–70.

258. **Белов Н.** Противоминные подводные аппараты // Зарубежное военное обозрение. — №4. — 1990. — С. 60–63.

259. **Бойко Ю.** Боевое применение дирижаблей на море // Зарубежное военное обозрение. — №3. — 1978. — С. 64–67.

260. **Бородин Ю.** Комплексная система охраны водного района // Военный парад. — Ноябрь–декабрь. — 1995. — С. 10–13, 133–135.

261. **Васильев Г.** Использование морских животных в военных целях // Зарубежное военное обозрение. — 1983. — №1. — С. 33–34.

262. **Васильев В.Ю., Крутиков А.В.** Двухзвенные необитаемые подводные аппараты // Судостроение за рубежом. — 1989. — №4. — С. 5–15.

263. **Васильев В.Ю., Черненко А.В., Крутиков А.В.** Малогабаритные телеуправляемые подводные аппараты // Судостроение за рубежом. — 1989. — №2. — С. 25–33.

264. **Васильев В.Ю., Сахаров Б.Д., Черненко А.В., Крутиков А.В.** Направления развития автономных необитаемых подводных аппаратов // Судостроение за рубежом. — 1989. — №6. — С. 22–34.

265. **Васильков В.В.** Современные кабели для подводных телеуправляемых манипуляционных роботов // Судостроение за рубежом. — 1978. — №7. — С. 39–48.

266. **Горопашная А.В.** Логико-вероятностный анализ безопасности кораблей ВМФ при возникновении аварийных ситуаций // Судостроение. — №2. — 2009. — С. 32–34.

267. **Глушков В.М.** Гносеологическая природа информационного моделирования / В.М. Глушков // Вопросы философии. — 1963. — № 10. — С. 3–18.

268. **Данилов Р., Андреев А.** Средства воздушной разведки // Авиация и космонавтика. — №11. — 1982. — С. 46–47.

269. **Дементьев П.** Дирижабли общего и целевого назначения ДП-800 и ДП-6000 // Военный парад. — Июль–август. — 1994. — С. 72–74, 162–164.

270. **Денисов С.Л.** Подводные оптоволоконные линии связи. Укладка кабелей, конструкция и свойства кабелей, энергоснабжение линии, подводные оптические усилители // НТО «ИРЭ-ПОЛЮС». — 26 с.

271. **Директоров Н.** Волоконно-оптическая техника в подводных кабельных магистралях связи // Морской сборник. — 1987. — №7. — С. 68–69.

272. **Журавлёв В.Ф., Пузырёв Г.В., Тильман А.Х.** Подводные буксируемые системы // Судостроение. — 1968. — №11. — С. 18–21.

273. **Кабаков А.** Тросы и снасти. Применение на яхтах. Ч. 2 // Шкіпер, яхти, катери, човни. — Жовтень 2011. — №4 (78). — С. 71–72.

274. **Кабаков А.** Тросы и снасти. Ч. 3. Применение на яхтах // Шкіпер, яхти, катери, човни. — Жовтень 2011. — №5 (79). — С. 80–81.

275. **Казин Д.** Особенности системы спасения экипажей подводных лодок ВМС США // Зарубежное военное обозрение. — №3. — 2014. — С. 74–83.

276. **Картошкин А.М.** Об использовании волоконной оптики в военно-морской технике // Судостроение за рубежом. — 1976. — № 8. — С. 46–51.

277. **Качур П.** Состояние и перспективы развития дирижаблей нового поколения // Зарубежное военное обозрение. — №4. — 1992. — С. 36–44.

278. **Колпаков А.** Английский акустический трал «Осборн» // Зарубежное военное обозрение. — 1986. — №8. — С. 58–59.

279. Корабли-сапёры. Базовый тральщик пр. 257Д // Моделист-конструктор. — №8. — 1996. — С. 23–26.

280. **Кравченко Ю.** Минное оружие в войне на море // Зарубежное военное обозрение. — №9. — 1990. — С. 51–54.

281. **Кривинский Б.** Системный подход и моделирование — эффективные методы исследования проблем вооружённой борьбы на море // Морской сборник. — №11. — 1979. — С. 20–25.

282. **Коротков В.К.** Батиплан «Атлант – 1» // Судостроение. — 1986. — №7. — С. 14–16.

283. **Лакерник Р. Шарле Д.** У телефона — континент // Наука и жизнь. — 1988. — №8. — С. 56–61.

284. **Ланг В.П., Пиянзов Г.Г.** Силы и средства вертолётного тралення мин // Судостроение за рубежом. — 1989. — №6. — С. 3–16.

285. **Макшеев В.И.** Стальные тросы для рыболовного флота // Рыбное хозяйство. — 1966. — № 12. — С. 21–27.

286. **Мангаев Г., Мустафин Ш.** Российские корабли противоминной обороны // Военный парад. — Ноябрь–декабрь. — 1995. — С. 16–17, 135–136.

287. **Мехоношин Н.** Привязные аэростаты и их применение // Зарубежное военное обозрение. — №6. — 1989. — С. 40–43.

288. **Мехоношин Н.** Разработка дирижабля ДРЛО для ВМС США // Зарубежное военное обозрение. — №8. — 1988. — С. 53–55.

289. **Москалёв В.** Устройство для уничтожения диверсионных мин // Зарубежное военное обозрение. — №6. — 1987. — С. 54.

290. **Мустафин Ш.** Рейдовые тральщики в системе противоминной обороны на море // Военный парад. — Июль–август. — 1995. — С. 100–103, 174–176.

291. **Николаев Н.** Развитие дирижаблей за рубежом // Зарубежное военное обозрение. — №10. — 1989. — С. 55–57.

292. Новый вертолётный тральщик ВМС США. Сообщения, события, факты // Зарубежное военное обозрение. — №5. — 1986. — С. 82.

293. **Нужный С.Н.** Особенности проектирования кабель-тросов для самоходных привязных подводных аппаратов // Республіканський міжвідомчий науково-технічний збірник електричного машинобудування та електрообладнання. — Одеса, 1998. — 224 с.

294. **Панков В.И.** Классификация судов и плавучих технических средств нефтегазопромыслового флота // Судостроение. — 1999. — №6. — С. 17–20.

295. **Петров Н.** Вертолёты-тральщики ВМС США // Зарубежное военное обозрение. — №11. — 1977. — С. 48–52.

296. **Петров Ю., Тюрин Б.** Противоминные корабли ВМС стран НАТО // Зарубежное военное обозрение. — №10. — 1977. — С. 51–54.

297. **Платон Евгений.** «Гетьман Сагайдачный» в Whitbread 1993/94. Главы из книги «Русские идут». — Шкипер. — №5 (91). — 2013. — С. 80–82.

298. Подводные электромеханические кабели // Судостроение за рубежом. — №8. — 1976. — С. 88–94.

299. **Простаков А.** Гидроакустические средства в системах поиска и уничтожения мин // Зарубежное военное обозрение. — №1. — 1987. — С. 62–65.

300. **Рач В.А.** Принципи формування концепций // Вісник Державної служби України. — №3. — 2000. — С. 93–95.

301. Рейс AF 447. Загадки и разгадки со дна океана // Взлёт. — 2011. — №7. — С. 40–46.

302. **Ремесло А.** С фотоаппаратом к морским слонам // Капитан-Клуб. — 2009. — №4. — С. 158–160.

303. **Ремесло А.** Какой кальмар самый большой? // Капитан-Клуб. — 2010. — №5. — С. 98–103.

304. **Розов В., Кудрявцев Л., Дмитриев В.** Использование аэростатов в ВМС США // Зарубежное военное обозрение. — №9. — 1985. — С. 66–68.

305. **Рюриков Д.** Минно-тральное и противолодочное командование ВМС США // Зарубежное военное обозрение. — №5. — 2009. — С. 60–66.

306. **Сиденко К., Голобоков С.** Защита портов и одиночных судов с помощью необитаемых подводных аппаратов // Морской флот. — №5. — 2008. — С. 28–30.

307. **Тюрин Б.** Базовый тральщик проекта 1265-Э // Военный парад. — Май–июнь. — 1994. — С. 60–62, 133–135.

308. **Урусов Ш. А.** Выбор запаса прочности и длины стального каната при буксировке на волнении // Судостроение. — 1979. — №6. — С. 17–18.

309. **Усов А., Колпаков А.** Контактные тралы // Зарубежное военное обозрение. — №4. — 1987. — С. 53–54.

310. **Чистяков И.** Беспилотные летательные аппараты для ВМС США // Зарубежное военное обозрение. — №2. — 1986. — С. 65–67.

311. Буксируемые аппараты (ПА). Раздел: Телеуправляемые ПА // Зарубежная военно-морская техника. — 1990. — №25. — С. 12 (Экспресс-информация. ЦНИИ «Румб»).

312. Робот для обслуживания и ремонта подводных кабелей. Раздел «Средства освоения Мирового океана» // Зарубежная военно-морская техника. — 1990. — №25. — С. 30 (Экспресс-информация. ЦНИИ «Румб»).

313. **Белый В. Д., Гончаренко Н. К., Ветров А. П., Молочков Ю. В.** Лабораторные и промышленные испытания различных конструкций канатов для ваеров рыболовных траулеров. — С. 237–240. (В кн.: Стальные канаты. Сборник статей. Вып. 5 / Под ред. д.т.н. Глушко М. Ф. — Т. 5. — К.: Техника, 1968. — 334 с.).

314. Управление гибкими протяженными объектами направленными силовыми воздействиями / Э. И. Блинов, В. И. Кравцов, А. В. Кравцов, А. Н. Недбайло // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. — 2003. — №1(11). — С. 79–86.

315. **Бабкин Г. В.** Оценка энергетических характеристик двухзвенной привязной подводной системы с буем-отводителем // II Міжнародна НТК «Проблеми енергозбереження і екології суднобудування». — Миколаїв: УДМТУ, 1998.

316. **Блинцов В. С.** Особенности проектировании одного класса подводных электрических кабелей // Электрооборудование судов: сб. научн. тр. — Николаев: НКИ, 1992. — С. 69–74.

317. **Блинцов В. С.** Оптимизация параметров кабель-тросов подводных аппаратов // Электрооборудование судов: сб. научн. тр. — Николаев: НКИ, 1992. — С. 74–78.

318. **Блинцов В. С.** К определениию величины питающего напряжения привязного самоходного подводного аппарата // Электрооборудование судов: сб. научн. тр. — Николаев: НКИ, 1992. — С. 90–92.

319. **Блінцов В. С., Магула В. Є.** Проектний розрахунок зусиль у кабель-тросі прив'язної підводної системи: Навчальний посібник. — Миколаїв: УДМТУ, 1998. — 43 с.

320. **Бугаенко Б. А.** Качка на нерегулярном волнении плавучих объектов, закреплённых на предварительно натянутых гибких связях / Б. А. Бугаенко, А. Ф. Галь // Збірник наукових праць НУК ім. адм. Макарова. — №1. — Миколаїв, 2012. — С. 38–42.

321. **Владинец Г. И., Дыхта Л. М.** К теории взаимодействия судна и якорного каната. — Труды НКИ. — Николаев, 1975. — Вып. 102. — С. 3–16.

322. **Горбань В. А., Салтанов Н. В., Христенко А. А.** О вынужденных колебаниях гибких нитей в потоках // Гидромеханика. — Киев: Наукова думка, 1978. — Вып. 38. — С. 113–118.

323. **Горбань В. А., Салтанов Н. В.** Колебания гибкой нити в наклонном потоке // Гидромеханика. — Киев: Наукова думка, 1985. — Вып. 29. — С. 76–81.

324. **Горшков, А. С.** Обобщение формул А. Н. Крылова для расчёта натяжения и формы гибкой нити в потоке // Океанология. — Вып. 6, т. IX. — М.: Наука, 1969. — С. 953–958.

325. **Гурвич А. А., Ефремов Н. С., Салтанов Н. В.** Нелинейные колебания нити в соосном потоке жидкости // Гидромеханика. — Киев: Наукова думка, 1973. — Вып. 27. — С. 29–33.

326. **Дмитроченко О. Н.** Методы моделирования динамики гибридных систем тел с учётом геометрической нелинейности // Динамика, прочность и надёжность транспортных машин / Сб. тр. под ред. Б.Г. Кеглина. — Брянск: БГТУ, 2001. — С. 24–34.

327. **Дружинин А. Д., Пшеничный Б. П.** Некоторые проблемы глубоководного рыбного промысла. — С. 315–320 (В кн.: Проблемы исследования и освоения Мирового океана / Под ред. д-ра техн. наук А.И. Вознесенского. — Л.: Судостроение, 1979. — 407 с. — Серия «Техника освоения океана»).

328. **Зинченко В. П., Долгов А. Н., Козлов А. А.** Математическое моделирование нестационарного движения разноглубинного трала // Инф. Пакет ВНИЭРХ, сер. «Промышленное рыболовство». — Вып. 1. — М.: ВНИЭРХ, 2000. — С. 10–13.

329. **Ильин С. Р., Самуся С. В.** Математическая модель нелинейных колебаний струны отвеса каната мобильной подъёмной установки // Наукові праці ДонНТУ. — Вип. 16(142). — С. 122–131.

330. **Калюх Ю. И., Горбань В. А.** Квазистатический анализ притопленных буйковых океанографических систем // Гидромеханика. — Киев: Наукова думка, 1986. — Вып. 53. — С. 72–76.

331. **Коган Е. М., Чумак А. Е.** Динамическое воздействие шквала на заякоренное судно // Труды НКИ. — Николаев, 1982. — Вып. 183. — С. 56–63.

332. **Константинов Н. С.** Колебания гибкой нити в вихревом потоке вязкой жидкости // Динамика систем твёрдых и жидких тел. — Вып. 5. — К.: Институт механики АН УССР, 1971. — ДЕП ВИНИТИ №3377-71. — С. 66–73.

333. **Королёв В. И.** Трёхмерная задача о движении системы тел в потоке // Гидродинамика. — Киев: Наукова думка, 1978. — Вып. 38. — С. 59–76.

334. **Королев В. И., Рогозин В. И.** Экспериментальные исследования вибрации гибких нитей в потоке с переменной скоростью // Гидромеханика. — Киев: Наукова думка, 1978. — Вып. 38. — С. 104–108.

335. **Королёв В. И., Лемешко Е. А.** Равновесие системы гибкая «нить–тело» в трёхмерном потоке жидкости // Гидромеханика. — Киев: Наукова думка, 1978. — Вып. 38. — С. 108–112.

336. **Кузнецов И. В.** О соотношении структуры научной теории и структуры объекта (В кн.: Очерки истории и теории науки. — М., 1969). — С. 118.

337. **Куликов П. С.** К вопросу о взаимодействии судна с причалом на недостаточно защищенной акватории. — Труды коорд. совещ. по гидротехнике. — Л.: Энергия, 1971. — Вып. 66. — С. 103–106.

338. **Кульмач П. П.** Некоторые вопросы динамического расчета установок плавучих заякоренных сооружений. — Труды коорд. совещ. по гидротехнике. — М.–Л.: Энергия, 1964. — Вып. 12. — С. 322–340.

339. **Кульмач П. П.** Вопросы развития исследования плавучих заякоренных сооружений. — Труды коорд. совещ. по гидротехнике. — Л.: Энергия, 1972. — Вып. 75. — С. 103–119.

340. **Купцов О. В.** Исследование статических и динамических характеристик комплекса «судно-ваер-трал» // Электрооборудование и автоматизация судов: Сб. статей. — Владивосток, 1975. — С. 55–64.

341. **Лаврентьев В. М.** Исследование движения судна при косом рывке буксирного троса // Труды ЦНИИ морского флота. Гидромеханика судна. — 1966. — Вып. 75. — С. 3–31.

342. **Либшер Х.** Научные понятия модели / в кн.: Эксперимент. Модель. Теория. [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с. — С. 182–194

343. **Магула В. Э.** Оценка динамических усилий в буксирном кабеле при рывке // Морские технологии. Сборн. научн. трудов НКИ. — Николаев, 1992. — С. 20–26.

344. **Макаренко А. И., Поддубный В. И., Салтанов Н. В.** Нелинейные колебания растяжимой нити с телом в потоке // Гидромеханика. — Киев: Наукова думка, 1986. — Вып. 53. — С. 56–61.

345. **Макаренко А. И., Поддубный В. И., Салтанов Н. В.** К исследованию нелинейных параметрических колебаний нити в соосном потоке // Гидромеханика. — Киев: Наукова думка, 1986. — Вып. 53. — С. 30–37.

346. **Минаков А. П.** Основы механики нити // Научно-исследовательские труды Московского текстильного института. — М., 1941. — Т. 9, вып. 1. — С. 47–51.

347. **Мосолов В. Е., Тихонов В. С.** Определение передаточной функции гибкой нерастяжимой нити при пространственном обтекании потоком. — Киев: Автоматика, 1979. — №4. — С. 24–30.

348. **Немчинов В. С.** Экономико-математические методы и модели. — М., 1965. — С. 32 (из: Пауль З. Эвристическая функция математики в процессе научного познания. — С. 195–215 (в кн.: Эксперимент. Модель. Теория [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.)).

349. **Новик И. Б.** О моделировании сложных систем. — М., 1965 (в кн.: Философская энциклопедия. — 1964. — Т. 3).

350. **Нужный С. Н.** Расчет электрических характеристик кабель-троса поискового подводного аппарата // Электрооборудование судов: Сб. научн. тр. — Николаев: НКИ, 1992. — С. 78–84.

351. **Пауль З.** Эвристическая функция математики в процессе научного познания. — С. 195–215 (в кн.: Эксперимент. Модель. Теория [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.).

352. **Поздеев В. А.** Некоторые вопросы динамики судна на якоре // Труды НКИ. — 1972. — Вып. 63. — С. 104–112.

353. **Поздеев В. А., Бескаравайный Н. М.** К теории нестационарных волновых задач акустики с усложненными граничными условиями // Теория, практика электроразрядных технологий. — Сб. научных трудов ИИПТ НАН Украины. — Николаев: Атолл, 2002. — Вып. 4. — С. 100–107.

354. Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений // Сборник научных трудов. — Вып. 127. — Львов: Свит, 1990. — 127 с. (Ивано-Франковский ин-т нефти и газа, 1990).

355. **Ратнер В. А.** Линейная упорядоченность генетических сообщений // Проблемы кибернетики. — 1966. — № 16. — С. 44–45.

356. **Романов В. Н., Семенов В. Г., Шелудяков А. А.** Метод эквивалентной нагрузки для решения задач статики гибкой нити // Сборник «Совершенствование судовых устройств и гибких конструкций: Сборник научных трудов. — Николаев: НКИ, 1988. — 103 с. — С. 58–63.

357. **Рузавин Г.Я.** Возрастание абстрактности научного знания и проблемы его математизации (В кн.: Методологические основы теории научного знания. — Свердловск, 1973. — Ч. 2. — С. 129–130).

358. **Филин А.П.** К отысканию геометрии весомой равно напряженной нити, находящейся под воздействием сил собственного веса и гидростатической нагрузки // Труды ЛКИ. — №192. — 1979. — С. 91–98.

359. **Хагер Н.** Этапы формирования моделей. — С. 128–142 (в кн.: Эксперимент. Модель. Теория [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.).

360. **Штофф В.С.** Моделирование и философия. — М.–Л., 1966. — С. 19 / из: Гёрц Г. Соотношение между экспериментом, моделью и теорией в процессе естественного познания. — С. 5–22 (в кн.:Эксперимент. Модель. Теория [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.).

361. **Эшби Р.** Системы и информация // Вопр. философии. — 1964. — №3. — С. 82–84.

362. **Горбань В.О.** Моделювання нестаціонарної взаємодії тіл в потоках // Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, спеціальність 01.02.05 — Механіка рідини, газу та плазми. — Київ, 2010. — 332 с.

363. **Соловьёв А.А.** Переходные режимы движения судна при буксировке разноглубинного трала // Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. — Ленинград: ЛВИМУ, 1989. — 159 с.

364. **Мейлер Л.Е.** Исследование и расчёт сил, действующих на канаты океанологических и рыболовных буксируемых систем // Автореф. канд. дисс. — М.: Институт океанологии АН СССР, 1983. — 22 с.

365. **Суднин В.М.** Нестационарное движение траловой системы // Автореферат докт. дисс. — Мурманск: КГТУ, 2000. — 32 с.

366. **Тюхтин В.С., Вовк С.Н.** О гносеологическом статусе математической теории эксперимента. — С. 62–75 (в кн.: Эксперимент. Модель. Теория [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.).

367. **Abel J.** Cable interactions in a depth controlled submersible // Hydronaut. — 2 (6). — 1972. — P. 83–89.

368. **Asser G.** Zum Vorhaltnis von Mathematik und objektiver Realitat.— Dtsch Zeitschr. Philos., 1965, Bd. 13 H. 2, S. 173–176 / из: Либшер Х. Научные понятия модели. — С. 182–194 (в кн.: Эксперимент. Модель. Теория. [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.).

369. **Asser G.** Formalisierung, Modollicrung und Mathematisierung aus der Sicht der mathematischen Grundlagenforschung.— In: Albrecht E. et al. Streitbarer Materialismus und gegenwartige Naturwissenschaft. Berlin, 1974, S. 53 / из: Либшер Х. Научные понятия модели. — С. 182–194 (в кн.: Эксперимент. Модель. Теория. [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.).

370. **Buchanan P.R.** Progect Management. — Kogan Page, GB, 1993 (из: Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. — Мн.: Дизайн про, 2004. — 640 с.).

371. **Gale P. Foster.** Advantages of Fiber Rope OverWire Rope // Journal of Industrial Textiles. — Vol. 32. — No. 1. — July 2012. — Pp. 67–78. — Downloaded from jit.sagepub.com of Admiral Makarov National univ. on April 22, 2016.

372. **K. Palani Kumar and Shadrach Jeya Sekaran.** Some natural fibers used in polymer composites and their extraction processes: A review // Journal of Reinforced Plastics & Composites. — Vol. 33(20). — 2014. — Pp. 1879–1892. — Downloaded from jit.sagepub.com of Admiral Makarov National univ. on April 22, 2016.

373. **Dmitrochenko O.N., Pogorelov D.Yu.** Generalization of plate finite elements for absolute nodal coordinate formulation // Multibody System Dynamics 10, No. 1, Special issue 'Virtual Nonliner Multibody Systems', Kluwer, Dordrecht, 2003, pp. 17–43.

374. **Fritsch G.** Methodik des naturwissenschaftlichen Denkens. — In: Physik — gestern, heute, morgen. Munchen, 1971, S. 28 ff. / из: Хагер Н. Этапы формирования моделей. — С. 128–142 (в кн.: Эксперимент. Модель. Теория [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.).

375. **Ley H.** Der Begriff des Modells in der Biologie. — Dtsch. Zeitschr. Philos., S. 115. (из: Хагер Н. Этапы формирования моделей. — С. 128–142 (в кн.: Эксперимент. Модель. Теория [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.).

376. **Peschel M.** Was ist Modellbildung? — Wiss. und Fortschr., 1976, Bd. 26, H. 3, S. 98 / из: Либшер Х. Научные понятия модели. — С. 182–194 (в кн.: Эксперимент. Модель. Теория [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.).

377. **Shabana A.A., Yakoub R.Y.** Three dimensional absolute nobal coordinate for beam elements; Theory // Journal of Mechanical Design 123, 2001, pp. 606–621.

378. Schiffe und Schiffahrt von Morgen. Rolf Schonkenecht, Jurgen Lusch, Manfred Schelzel, Hans Obenaus / VEB Verlag Technik, Berlin, 1979. — 240 p.

379. **Schroter K.** Das mathematische Modell und das Modell in der Naturwissen-schaft.— In: Arzt und Philosophie. Berlin, 1961, S. 146—149 / из: Либшер Х. Научные понятия модели. — С. 182–194 (в кн.: Эксперимент. Модель. Теория [Сб. статей], АН СССР. Ин-т философии. — М.: Наука, 1982. — 333 с.).

380. **Schwertassek R.** Flexible bodies in multibody systems. — Computational methods in mechanical sysnems: mechanism analysis, synthesys and optimization / Jorge Angeles, Evtim Zakhariev. p. cm. — (NATO ASI series. Series F, Computer and systems sciences; vol. 161). — Pp. 329–363.

381. Tűrkiye ve NATO Űlkeleri // SAVUNMA VE HAVACILIK. — No 5. — 1994. — Pp. 64–70.

382. Проведение экспериментальных исследований траловой лебедки траулера типа «Гируляй» (Исследование процессов нагружения траловой лебедки ЛЭТрС 3). Отчет (Руков. работы проф., д. т. н. Кривенко И.С., отв. исп. Трунин К. С.); № ГР 0185.0000266; Ин. № 0285.0000225. — Ленинград, 1983. — 44 с.

383. **Трунин К.С.** Динамика системы «судно–траловая лебедка–ваер–трал» // Труды НКИ. Динамика и прочность судовых машин. — 1981. — Вып. 182. — С. 36–43.

384. **Трунін К.С.** Динаміка системи «судно–глибоководний трал» при донному зачепленні трала // Машинознавство. — 2006. — №4. — С. 39–41.

385. **Трунін К.С.** Модель еквівалентного однорідного стрижня для динамічно навантаженого сталевого каната з органічним сердечником // Машинознавство. — 2007. — №6. — С. 42–44.

386. **Трунин К.С.** Классификация морских привязных систем // Збірник наукових праць Севастопольського військово-морського ордена Червоної Зірки інституту ім. П.С. Нахімова. — Севастополь: СВМІ ім. П.С. Нахімова, 2009. — Вип. 1(16). — С. 77–89.

387. **Трунин К.С.** Зацеп буксируемого объекта за препятствие на дне на примере зацепа траловой доски при глубоководном тралении // Рибне господарство України. — №7. — 2011. — С. 14–17.

388. **Трунін К.С.** Динаміка ривка системи «судно–глибинний трал» при донному зачепі трала // Машинознавство. — 2012. — №3–4. — С. 38–41.

389. **Трунін К.С.** Оцінка міцності буксирного троса підводної буксируємої системи при його зачепі за дно // Машинознавство. — 2012. — № 2. — С.22–26.

390. **Поздєєв В.О., Трунін К.С.** Динаміка ривка системи «судно–глибинний трал» при донному зачепі трала // Машинознавство. — 2012. — № 3–4. — С. 38–41.

391. **Трунин К.С.** Уравнения динамики элемента гибкой связи морской привязной системы // Збірник наукових праць НУК. — №1. — 2017. — С. 18–25.

392. **Трунин К.С.** Математическая модель двух связанных элементов гибкой связи морской привязной системы // Збірник наукових праць НУК. — №2. — 2017. — С. 3–12.

393. **Трунин К.С.** Компьютерная модель динамики морской привязной системы с гибкой связью // Збірник наукових праць НУК. — №4. — 2017. — С. 3–13.

394. **Трунин К.С.** Тестирование компьютерной программы модели динамики морской привязной системы с гибкой связью // Судостроение и морская инфраструктура. — №1. — 2017. — С. 95–108.

395. **Трунін К.С.** Совершенствование проектирования гибких связей для морских привязных систем // Вісник наукових праць НУК. — №1. — 2013. — Режим доступу: ev.nuos.edu.ua/material;jessionid=bd4785dda21cdafb0091dca1d12?publicationId=22485.

396. **Трунин К.С.** Классификация современных кабель-тросов для подводных исследований // Вісник наукових праць НУК. — №3. — 2013. — Режим доступу: ev.nuos.edu.ua/material;jsesionid=b8c7265e40f48e8943237369aaac?pub licationid=26740.

397. **Трунин К.С.** Аварийные режимы морских привязных систем // Збірник наукових праць НУК. — №1. — 2018.

398. **Трунин К.С.** Пространственное нестационарное движение морских привязных систем при маневрировании (на примере циркуляции) // Збірник наукових праць НУК. — №2. — 2018.

399. **Трунин К.С.** Пространственное движение морских привязных систем на примере буёв нейтральной плавучести // Збірник наукових праць НУК. — №3. — 2018.

400. **Трунин К.С.** Оценка дополнительного натяжения буксирного троса при ударе по нему в центральной части встречного подводного объекта // Збірник наукових праць НУК. — №4. — 2018.

401. **Трунин К.С.** Определение дополнительного натяжения буксирного троса при ударе по нему встречного постороннего подводного объекта в произвольном месте // Судостроение и морская инфраструктура. — № 1. — 2018.

402. **Трунін К.С.** Математичне моделювання системи «судно–траловий комплекс» // Тези доповіді на 6 МСУІМЛ у Львові. — Львів: Львівська політехніка, 2003. — С. 101–102.

403. **Поздеев В.А., Трунин К.С.** Математическая модель зацепа за дно донного трала при глубоководном рыболовном промысле // Безопасность мореплавания и её обеспечение при проектировании и постройке судов (БМС – 2004): Материалы международной научно-технической конференции. — Николаев: НУК, 2004. — С. 129–130.

404. **Трунин К.С.** Математическое моделирование тралового комплекса в условиях глубоководного промысла рыбы // Материалы международной научно-технической конференции «Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов» (БМС – 2004). — Николаев: НУК, 2004. — С. 131–132.

405. **Трунін К.С.** Про динаміку системи «судно траулер–глибинний трал» за умов донного зачепу тралу» // 7-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей. — Львів: КІНПАТРІ ЛТД., 2005. — С. 31–32.

406. **Трунін К.С.** Модель еквівалентного однорідного стрижня для динамічно навантаженого сталевого каната з органічним сердечником // Матеріали 8-го Міжнародного симпозіуму Українських інженерів-механіків у Львові (МСУІМЛ-8). — 2007. — С. 32.

407. **Трунін К.С.** Класифікація морських прив′язних систем // Матеріали IV Науково-технічної конференції «Живучість корабля та безпека на морі» у Севастопольському військово-морському ордена Червоної Зірки інституті ім. П.С. Нахімова, 27–29 травня 2009 р., м. Севастополь. — С. 41–42.

408. **Трунін К.С.** Дослідження гідродинамічної системи тралового комплексу «ваєр–трал» // Матеріали 9-го Міжнародного симпозіуму Українських інженерів-механіків у Львові (МСУІМЛ-9). — 2009. — С. 305–306.

409. **Трунін К.С.** Здійснення складних технічних проектів освоєння шельфу Чорного та Азовського морів // Тези до Інтернет-конференції «Перспективы экономической науки и практики в условиях мировых трансформаций». — Миколаїв, 2009.

410. **Трунін К.С.** Класифікація гнучких з'єднань морських прив'язних систем // «Розвиток наукових досліджень – 2009». Матеріали 5-ой міжнародної науково-практичної конференції, м. Полтава, 23–25 листопада 2009 г. — Полтава: Інтер-Графіка, 2009. — Т. 8. — С. 88—90.

411. **Трунин К.С.** Новые проектные задачи механики гибких связей морских привязных систем // Материалы XVII международной научно-технической конференции «Прикладные задачи математики и механики», 14–18 сент. 2009 г., СевНТУ / Научный ред. Ю.Е. Обжерин. — Севастополь, 2009. — С. 78–80.

412. **Трунін К.С.** Значення прийняття Морської доктрини України для розвитку морського транспортного комплексу // Науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, присвячена 90 річчю НУК імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, 24–26 березня 2010 р., секція «Розвиток технологій менеджменту в морському транспортному комплексі України». Програма. — Миколаїв: НУК, 2010. — С. 69.

413. **Трунін К.С.** Транспортна стратегія України // Науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, присвячена 90 річчю НУК імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, 24–26 березня 2010 р., секція «Розвиток технологій менеджменту в морському транспортному комплексі України». Програма. — Миколаїв: НУК, 2010. — С. 69.

414. **Трунін К.С.** Проблеми проектування гнучких елементів морських систем // Науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, присвячена 90 річчю НУК імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, 24–26 березня 2010 р., секція «Теорія та проектування суден, проблем гідродинаміки». — С. 48.

415. **Трунін К.С.** Класифікація аварій морських прив'язних систем // Наукові дослідження — теорія та експеримент 2010: Матеріали 6-ї Міжнародної науково-практичної конференції м. Полтава, 17–19 травня 2010 р. — Полтава: ІнтерГрафіка, 2010. — Т. 6. — С. 91–95.

416. **Трунін К.С.** Проблеми математичного моделювання гнучких з'єднань морських прив'язних систем. // Матеріали II міжнародної НПК «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2010), 25–27 травня 2010 р. — Збірник наукових праць II міжнародної НПК. Том. 1. — Херсон: Видавництво Херсонського державного морського інституту, 2010. — С. 226–230.

417. **Трунин К.С.** Применение математических моделей функционирования морских привязных систем // Материалы XVIII международной НТК «Прикладные задачи математики и механики», 13–17 вересня 2010 р., секція «Математичне моделювання», СевНТУ. — Севастополь, 2010. — С. 176–179.

418. **Трунін К.С.** Удосконалення методів проектування гнучких зв'язків морських прив'язних систем. // І Міжнародна НТК «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», присвячується 90-річчю НУК імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, 15–17 вересня 2010 р., секція «Проектування суден». Матеріали Першої Міжнародної НТК «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». — Миколаїв: НУК, 2010. — С. 137–138.

419. **Трунин К.С.** Динамика рывка системы «судно–глубоководный трал» при донном зацепе трала. // 10-й Міжнародний симпозіум інженерів-механіків у Львові, 25–27 травня 2011 р., Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів. — С. 357.

420. **Трунин К.С.** Определение дополнительного натяжения троса при ударе постороннего подводного объекта по буксирному тросу // Материалы XIX международной НТК «Прикладные задачи математики и механики», Секция «Механика твёрдого тела, жидкости и газа, акустика», СевНТУ. — Севастополь, 2011. — С. 67–69.

421. **Поздеев В.А., Трунин К.С.** Математическая модель динамически нагруженного стального троса с органическим сердечником // Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми фізико-математичних наук та підготовка фахівців у цій галузі», 15–17 вересня 2011 р., Николаевский национальный университет имени В.А. Сухомлинского: Тези доповідей XIII Всеукраїнської НМК. — С. 32–33.

422. **Трунин К.С.** Классификация технических средств освоения шельфа Чёрного моря // Матеріали МНПК «Розвиток менеджменту виробничої сфери в умовах глобалізації», 29–30.09.2011 р., НУК імені адмірала Макарова. — Миколаїв: НУК, 2011. — С. 222–225.

423. **Трунин К.С.** Определение максимальных нагрузок в элементах подводных буксируемых систем при аварийных режимах эксплуатации // ІІ Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», НУК імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, 5–7 жовтня 2011 р., секція «Сучасні методи досліджень у конструюванні і проектуванні суден та об'єктів океанотехніки». Матеріали ІІ Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». — Миколаїв: НУК, 2011. — С. 504–505.

424. **Трунин К.С.** Оценка дополнительного натяжения троса при ударе подводного объекта по буксирному тросу // XX МНТК «Прикладні завдання математики та механіки–2012», СевНТУ, м. Севастополь. — Прикладні завдання математики та механіки («ПЗММ–2012»). — Матеріали XX міжнар. наук.-техн. конф. Севастополь, 10–14.09.2012 р. // М-во освіти і науки, молоді та спорту України; Севастоп. нац. техн. ун-т; наук. ред. С.О. Папков. — Севастополь: СевНТУ, 2012. — С. 63–66.

425. **Трунин К.С.** Проблемы совершенствования методов проектирования гибких связей морских привязных систем // Всеукраинская научно-техническая конференция «Современные проблемы в океанотехнике», 25–27 сент. 2013 г., СевНТУ. — Сучасні проблеми в океанотехніці: матеріали всеукраїн. наук.-техн. конф., Севастополь, 25–27 верес. 2013 р. / М-во освіти і науки України; Севастоп. нац. техн. ун-т; наук. ред. В.Р. Душко. — Севастополь: СевНТУ, 2013. — С. 10–13.

426. **Трунин К.С., Титов С.Д.** Определение дополнительного натяжения троса при ударе постороннего подводного объекта по буксирному тросу в произвольном месте // XXI МНТК «Прикладні завдання математики», СевНТУ, м. Севастополь, («ПЗММ–2013»), 16–20.09.2013 р. — Прикладні завдання математики: матеріали XXI між нар. наук.-техн. конф., Севастополь, 16–20 верес. 2013 р. / М-во освіти і науки України; Севастоп. нац. техн. ун-т; наук. ред. С.О. Папков — Севастополь: СевНТУ, 2013. — С. 66–69.

427. **Трунин К.С.** Особенности проектирования гибких связей морских привязных систем // IV Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», НУК імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, 9–11 жовтня 2013 р. — Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв: НУК, 2013. — С. 100–103.

428. **Трунин К.С.** Классификация кабель-тросов для подводных исследований // «Наукові дослідження — теорія та експеримент 2013». Матеріали 9-ї міжнародної НПК, м. Полтава, 29–31.05.2013 р. — Полтава: ІнтерГрафіка, 2013. — Т. 5. — С. 69–73.

429. **Трунин К.С.** Определение дополнительного натяжения троса при ударе постороннего подводного объекта по буксирному тросу в произвольном месте // XXI МНТК «Прикладні завдання математики», СевНТУ, м. Севастополь («ПЗММ–2013»), 16–20.09.2013 р. — Прикладні завдання математики: матеріали XXI між нар. наук.-техн. конф., Севастополь, 16–20 верес. 2013 р. / М-во освіти і науки України; Севастоп. нац.. техн. ун-т; наук. ред. С.О. Папков. — Севастополь: СевНТУ, 2013. — С. 66–69.

430. **Трунин К.С.** Математическая модель морской привязной системы с гибкой связью // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв: НУК, 2014. — С. 386–388.

431. **Трунин К.С.** Алгоритм моделирования динамики морской привязной системы с гибкой связью // Підводна техніка і технологія: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю: в 2 ч. — Миколаїв: НУК, 2014. — Ч. 1. — С. 36–42.

432. **Трунин К.С.** Математическая модель гибкой связи в составе морской привязной системы // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв: НУК, 2015. — С. 300–304.

433. **Трунін К.С.** Системи технологій морегосподарського комплексу України // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв: НУК, 2014. — С. 458–464.

434. **Трунин К.С.** Компьютерная модель динамики морской привязной системы с гибкой связью // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв: НУК, 2016. — С. 296–298.

435. **Трунин К.С.** Тестирование компьютерной программы модели динамики морской привязной системы с гибкой связью // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв: НУК, 2016. — С. 298–303.

436. **Трунин К.С.** Моделирование пространственного движения морской привязной системы // Підводна техніка і технологія: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю: в 2 ч. — Миколаїв: НУК, 2016. — Ч. 1. — С. 47–55.

437. **Трунин К.С.** Оценка дополнительного натяжения буксирного троса при ударе по нему в центральной части встречного подводного объекта / К. С. Трунин // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». — Миколаїв: НУК, 2017. — С. 302–307.

438. **Трунин К.С.** Пространственное движение морских привязных систем на примере буёв нейтральной плавучести // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». — Миколаїв: НУК, 2017. — С. 311–317.

439. **Трунин К.С.** Определение дополнительного натяжения буксирного троса при ударе по нему встречного постороннего подводного объекта в произвольном месте // Підводна техніка і технологія, ПТТ-2017: Матеріали VI Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю: в 2 ч. — Миколаїв: НУК, 2017. — Ч. 1. — С. 46–54.

440. Классификация кабелей и проводов: Информационный меморандум // Севкабель холдинг. — Режим доступа: http://www.sevcable.ru.

441. Каталог продукции Азовской Кабельной Компании — С. 56–64. — Режим доступа: http://www.gosgor.ru/content/content05-8.htm.

442. Классификация коаксиальных кабелей. — Режим доступа: http://bobiki 1994.narod.ru/stafkoax.html.

443. Коаксиальный кабель. — Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki.

444. Общие сведения о ВОК. Классификация оптических кабелей связи. — Режим доступа: http://www.ruscable.rU/info/optic/common/2.html.

445. Особенности и отличия волоконно-оптических кабелей LAPP. — Режим доступа: http://market.elec.ru/nomer/12/lapp/.

446. ООО «Морские Программные комплексы и технологии. Кабель подводный КП-1. — Режим доступа: http://www.mpkit.ru/pkab1.html.

447. Буксируемые кабельные системы. Кабели различного назначения. ООО «Псковгеокабель». — Режим доступа: http://www.pskovgeokabel.ru/catalog'sea-cabel/kabely/43.

448. Математический пакет Delphi / Языки программирования. — Режим доступа: http://rucodes.com/mathematical-functions-delphi.html.

449. Верификация / Материал из Википедии. — П. Грогоно, Программирование на языке Pascal. — М.: Мир, 1982. — С. 295 (Тестирование и верификация).

450. **Казиев В.** Введение в информатику: Лекции. Методы разработки и анализа алгоритмов. — Режим доступа: https://www.book.ru/book/917600/view2/1.

451. Тестирование программ на ЭВМ. Основные этапы решения задач на ЭВМ. — Режим доступа: http://inf.e-alekseev.ru/text/Etapy_resh_zad.html.

452. **Соловьев С.В., Цой Р.И., Гринкруг Л.С.** Технология разработки прикладного программного обеспечения. — М.: Академия Естествознания, 2011. — 408 с.

453. **Греку Р.Х.** Дрейфующие буи для исследования течений в океане / Р.Х. Греку, Г.А. Острецов, В.А. Пучкин, А.В. Черкасова. — Севастополь: МГИ, 1978. — 18 с.

454. **Жмур, В.И.** Зачем вода течёт в воде? // Популярная механика. — №7 (129). — 2013. — С. 38–42.

455. **Блінцов В.С., Бабкін Г.В., Блінцов О.В., Буруніна Ж.Ю., Куценко П.С.** Сучасні завдання проектування та застосування засобів морської робототехніки // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв: НУК, 2017. — С. 46–47.

456. **Блінцов В.С., Буруніна Ж.Ю., Соколов В.В.** Сучасні завдання створення і застосування безекіпажних морських систем для Азово-Черноморського басейну // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв: НУК, 2017. — С. 83–85.

457. **Трунин С.Ф.** Проектирование элементов судовых машин, транспортных и загрузочных технологических устройств: Учеб. пособ. — Л.: Судостроение, 1989. — 272 с.

458. **Борисов В.И.** Общая методология конструирования машин. — М. Машиностроение, 1978. — 120 с.

459. **Трунин К.С.** Определение предельного состояния элементов конструкций судовой техники. Тезисы докладов XII Всесоюзной научно-технической конференции «Повышение технического уровня судостроительного производства в XIII пятилетке». Всесоюзное научно-техническое общество имени академика А.Н. Крылова. ЦНИИТС, секция технологии судостроения. — Ленинград, 1990. — С. 156–157.

460. **Трунин К.С.** Динамика морской привязной системы с гибкой связью // Збірник наукових праць НУК. — №3. — 2017. — С. 3–10.

461. **Бугаенко Б.А., Галь А.Ф.** Вспышка новой звезды — драма технических идей (очерк истории проектно-конструкторского бюро «Прогресс»). — Николаев: УГМТУ, 1997. — 172 с.

462. **Васильев П.А., Машенский С.Н.** Корабль как птица / П.А. Васильев, С.Н. Машенский. — М.: Военная книга, 2009. — 104 с.

463. **Жданов Л.Б.** Полная энциклопедия кораблей и судов / Справочное издание. — М.: МОРКНИГА, 2009. — 312 с.

464. **Балкин С.А., Заблоцкий В.П.** Советские авианосцы. Авианесущие крейсера адмирала Горшкова. — М.: Коллекция, Яуза, ЭКСМО, 2007. — 240 с.

465. **Александров Ю.И., Апальков Ю.В.** Боевые корабли мира на рубеже XX–XXI веков. Том II. Авианосцы, крейсера, эскадренные миноносцы. Современное состояние и перспективы развития: Справочник в двух частях. Часть I. Авианосцы и крейсера. — СПб: Галея Принт, 2005. — 204 с.

466. ГОСТ 12617-67. Лебедки судовые грузовые. Общие технические условия (не действует). В настоящее время в Украине действует ГОСТ 12617-78.

467. ГОСТ 3083-66 (не действует). ГОСТ 3083-80. Канат двойной свивки типа ТК конструкции 6×30 (0+15+15) + 7 о.с. Сортамент скасований в Україні (Леонорм).

468. ГОСТ 7668-69 (не действует). ГОСТ 7668-80. Канат двойной свивки типа ЛК-РО конструкции 6<x>36 (1+7+7/7+14) + 1 о.с. Сортамент скасований в Україні ГОСТ 7668-80, Канаты стальные. Сортамент. Канат двойной свивки типа ЛК-РО конструкции 6х36 (1+7+7/7+14)+1 о.с. Документ замінює: ГОСТ 7668-69. — Режим доступу: http://normativ.com.ua/types/tdoc3627.html.

469. NATO's Fifteen Nations, 1977, II–III, 20, № 1, p. 31.

470. Буксируемая гидроакустическая станция (ГАС) пассивного типа CAPTAS-4: Справочные данные // Зарубежное военное обозрение. — №10. — 2011. — С. 75.

471. **Чухонцев А.М.** Исследование динамических нагрузок на траловую лебедку и обоснование выбора гидропривода. — М., 1969. — 148 с.

472. **Сабуренков Н.М.** Исследование работы траловых лебедок // Труды ВНИРО. Т. 41. — 1959. — 76 с.

473. **Черепанов Б.Е.** Лебедки рыбопромысловых траулеров. — Мурманское книжное изд., 1966. — 358 с.

474. **Саковец О.И.** Влияние качки корабля на нагрузку ваеров трала. — Рыбное хозяйство. — 1965. — №5. — С. 12.

475. **Биргер И.А., Шорр В.Ф., Иосилевич Г.Б**. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1979. — 702 с.

476. **Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М.** Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие. — Изд. 3-е, перераб. и доп. / Под ред. С.В. Серенсена. — М.: Машиностроение, 1975. — 488 с.

477. **Гладкий В.Ф.** Прочность, вибрация и надежность конструкции летательного аппарата. — М.: Наука, 1975. — 456 с.

478. **Серенсен С.В., Козлов Л.А.** К расчету на прочность при нестационарной переменной напряженности. — Вестник машиностроения. — 1962. — №1. — С. 11–I7.

479. **Серенсен С.В., Козлов Л.А.** Характеристики нестационарной напряженности и определение запаса прочности. — Вестник машиностроения. — 1964. — №6. — С. 10–18.

480. **Серенсен С.В., Бухарин Н.А., Буглов Е.Г., Снытин М.Е.** К установлению режимов переменной напряженности для расчета на усталость // Вестник машиностроения. — 1961. — №1. — С. 15–22.

481. **Серенсен С.В., Буглов Е.Г.** Развитие расчета прочности деталей машин в связи с оценкой надежности. — Вестник машиностроения. — 1965. — №2. — С. 3–13.

482. **Кордонский Х.Б., Дышлер И.Б., Громов Г.В.** Вероятностное обоснование норм прочности // В кн.: Прочность материалов конструкций. — Киев: Наук. думка, 1975. — С. 208–222.

483. **Серенсен С.В.** Статистические методы и прочность конструкций // В кн.: Статистические вопросы прочности в машиностроении. — М.: Машгиз, 1961. — 75 с.

484. **Серенсен С.В., Буглов Е.Г.** О прочности деталей в связи с вероятностным представлением о нагруженности и характеристиках усталости // Вестник машиностроения. — 1960. — №11. — С. 23–32.

485. **Трунин К.С.** Совершенствование проектирования морских подводных систем с гибкими связями на основе компьютерной модели их динамики // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції. — Миколаїв: НУК, 2018. — С. 306–308.

Трунін К. С.

Гнучкі зв'язки в морських прив'язных системах : Монографія / К. С. Трунін. — Миколаїв : видавець Торубара В. В., 2019. — 536 с.

ISBN 978-617-7472-28-4

У монографії представлено використання гнучких зв'язків в морських прив'язних системах від їх появи до наших днів. Розглянуто різні режими експлуатації морських прив'язних систем, наведено їх класифікацію, розглянуто математичні моделі динаміки.

Розроблено математичну модель статики і динаміки гнучких зв'язків (ГЗ) у складі морських прив'язних систем (МПС), алгоритм моделювання динаміки ГЗ, комп'ютерну програму, що описує динаміку морської прив'язної системи і дозволяє визначати параметри ГЗ і МПС.

Призначена для студентів і аспірантів, а також для фахівців, пов'язаних із використанням і проектуванням МПС з ГЗ.

Наукове видання

ГНУЧКІ ЗВ'ЯЗКИ В МОРСЬКИХ ПРИВ'ЯЗНЫХ СИСТЕМАХ

МОНОГРАФІЯ

(російською мовою)

Комп'ютерна верстка, дизайн обкладинки: Торубара В. В.
Коректор: Торубара О. С.
Друкується в авторський редакції

Формат 70×90/16. Умов. друк. арк. 31,2.
Тираж 100 пр. Зам. № 2/19.

Видавець та виготовлювач Торубара В. В.
вул. Наваринська, 5–17, м. Миколаїв, 54001
тел.: (0512) 37-81-28, (067) 800-70-70

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4626 від 9.10.2013



Трунин Константин Станиславович

Родился 7 марта 1958 в г. Дружковка Донецкой области.

В 1981 г. окончил Николаевский кораблестроительный институт, квалификация — инженер-механик. С 1985 г. — строитель, старший строитель ОГС-1 Черноморского судостроительного завода, с 1992 г. — начальник бюро научно-технической информации и пропаганды ПО ЧСЗ, 1994–1997 гг. — начальник бюро экспорта ОВЭС ЧСЗ. С 1997 г. по н. вр. работает в системе высшего образования. В 1999–2001 гг. получил второе образование по специальности экономист-финансист. Кандидат технических наук (с 1989 г.), доцент кафедры менеджмента НУК.

Автор 70 научных и учебно-методических работ.

Научные интересы: менеджмент внешнеэкономической деятельности и предприятий, менеджмент морехозяйственного комплекса Украины, системы технологий МХК Украины, управление персоналом, принятие управленческих решений, научно-технические проблемы совершенствования проектирования МПС с гибкими связями.