

**Kostiantyn S. Trunin****Трунин
Константин
Станиславович**

УДК 531.66: 626.76

DETERMINATION OF SUPPLEMENTARY TENSION OF TOWING ROPE UNDER IMPACT OF BE FOND UNDERWATER OBJECT IN THE UNSPECIFIED PART UP TO THE ROPE

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАТЯЖЕНИЯ ТРОСА ПРИ УДАРЕ ПОСТОРОННЕГО ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА ПО БУКСИРНОМУ ТРОСУ В ПРОИЗВОЛЬНОМ МЕСТЕ

DOI 10.15589/SMI20180209**Kostiantyn S. Trunin**

К. С. Трунин, канд. техн. наук, доц.
trunin.konstantin.stanislav@gmail.com
ORC ID: 0000-0001-6345-6257

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev**Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

Abstract. The aim of the study is to determine values of dynamic tension towline upon impact thereon in an arbitrary portion outside of the underwater object (UO) using the model developed computer MTS dynamics construction. When towing UTO, which is regarded as SV, a collision occurs, for example, rescue submersible vehicle (SV) moving collision course under water, with a towing rope (TR) in any place. We investigated the impact of TR process OUO. In the modeling process assumed that the marine object weighing 10 tons remains associated with the construction (not relieved from it) at all times during its movement, in both the positive and the negative direction shows the steps of construction shape changes due to a pin on it in the region 25 m from carrier vessel (CV), 50 m from CV and SV and 75 m from CV. The results of calculations using the mathematical model of the dynamics of MTS with FL, which specify calculations obtained with the traditional method and using a computer model developed by MTS dynamics construction. Mathematical modeling results indicate that the construction shape during interaction with OUO significantly depends on the position of the point of impact. It may be noted that the closer shot marine object to CV, the greater the tension construction. However, the strength of GE tension affects not only the position of the point of impact, but also the mobility of CV and PA. Approximation of the point of impact to CV independently by weight SV (from 0,15 to 10 t), almost does not change the tension force indigenous heavy end nearest CV, but the lead end of the tension farm near SV significantly increases with increasing SV mass. Approximation of the point of impact marine object to the FL reduces heavy tension force near CV but it increases near the SV. If the SV is stationary, while the tension near FL SV increases indefinitely, leading to its rupture. Bang in the middle FL the safest largest of its tension. The scientific novelty of this study lies in the fact that using a computer model developed by the MTS speakers FL for UTS candetermine the velocity of CV and SV modules, upon impact thereon UOU in an arbitrary position that allows improved method of designing and construction FL of MTS under shock loads during emergency operation.

Keywords: underwater towed system; flexible connection; towed rope; the dynamic tension of the cable; a blow to the tow rope in any

Аннотация. Целью исследования является определение значения динамического натяжения буксирного троса при ударе по нему в произвольной части постороннего подводного объекта (ППО) с помощью разработанной компьютерной модели динамики морской привязной системы (МПС) с гибкой связью (ГС). При буксировке подводного буксируемого объекта (ПБО), в качестве которого рассматривается привязной подводный аппарат (ППА), происходит столкновение, например, спасательного подводного аппарата (ПА), движущегося встречным курсом под водой, с буксирным тросом (БТ) в произвольном месте. Исследован процесс удара ППО по БТ. 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 направлениях. Приведены этапы изменения формы ГС в результате удара по ней на расстоянии 25 м от судна-носителя (СН), 50 м от СН и ПА и 75 м от СН. Представлены результаты расчётов с помощью математической модели динамики МПС с ГС, которые уточняют расчёты, полученные традиционным способом и с примени-

ем разработанной компьютерной модели динамики МПС с ГС. Результаты математического моделирования показывают, что форма ГС в процессе взаимодействия с ППО существенно зависит от положения точки удара. 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. 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. Удар посередине ГС наиболее безопасен по величине её натяжения. Научная новизна данного исследования заключается в том, что, используя разработанную компьютерную модель динамики МПС с ГС для подводной буксируемой системы (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.

Ключевые слова: подводная буксируемая система; гибкая связь; буксирный трос; динамическое натяжение троса; удар по буксирному тросу в произвольном месте; совершенствование методики проектирования МПС с ГС.

Анотація. Метою дослідження є визначення значення динамічного натягу буксирного троса при ударі по ньому в довільній частині стороннього підводного об'єкта (СПО) за допомогою розробленої комп'ютерної моделі динаміки морської прив'язної системи (МПС) із гнучким зв'язком (ГЗ). При буксируванні підводного буксирного об'єкта (ПБО), в якості якого розглядається прив'язний підводний апарат (ППА), відбувається зіткнення, наприклад, рятувального підводного апарата (ПА), що рухається зустрічним курсом під водою, з буксирним тросом (БТ) у довільному місці. У процесі моделювання припускали, що морський об'єкт масою 10 т залишається зв'язаним із ГЗ (не звільняється від нього) протягом усього часу його руху як у позитивному, так і у негативному напрямках. Наведені етапи зміни форми ГЗ у результаті удару по ньому на відстані 25 м від судна-носія (СН), 50 метрів від СН і ПА та 75 м від СН. Подані результати розрахунків за допомогою математичної моделі динаміки МПС із ГЗ, які уточнюють розрахунки, отримані традиційним способом та із застосуванням розробленої комп'ютерної моделі динаміки МПС із ГЗ. Результати математичного моделювання показують, що форма ГЗ у процесі взаємодії із СПО істотно залежить від положення місця удару. Можна відзначити, що чим ближчий удар морського об'єкта до СН, тим більша сила натягу ГЗ. Однак на силу натягу ГЗ впливає не тільки положення точки удару, але й рухливість СН і ПА. Наближення точки удару морського об'єкта до СН, незалежно від маси ПА (від 0,15 до 10 т), практично не змінює силу натягу корінного кінця ГЗ біля СН, але натяг ходового кінця ГЗ біля ПА істотно зростає зі збільшенням маси ПА. Наближення точки удару морського об'єкта до ПА зменшує силу натягу ГЗ біля СН, але збільшує її поблизу ПА. Якщо ПА нерухомий, тоді натяг ГЗ поблизу ПА необмежено зростає, що призводить до її розриву. Удар посередині ГЗ є найбільш безпечним за величиною його натягу. Наукова новизна даного дослідження полягає в тому, що, використовуючи розроблену комп'ютерну модель динаміки МПС із ГЗ для підводної буксирної системи (ПБС), можна визначити модулі швидкості СН і ПА при ударі по ньому СПО в довільному місці, що дозволяє вдосконалити методику проектування ГЗ МПС і ПБС в умовах ударних навантажень при аварійних режимах.

Ключові слова: підводна буксирувальна система; гнучкий зв'язок; буксирний трос; динамічний натяг троса; удар по буксирному тросу в довільному місці; удосконалення методики проектування МПС із ГЗ.

References

- [1] Yurnev, A. P. (1986). *Avarii pod vodoy* [Accidents under water], 2-nd issue. – Leningrad: Sudostroenie [in Russian].
- [2] Trunin, K. S. (2011). *Opreделение maksimalnykh nagruzok v elementakh podvodnykh buksiruemykh sistem pri avariynnykh rezhimakh ekspluatatsii* [Determination of maximal loads at the elements of underwater towing systems at emergency operation regimes]. Innovations at the Shipbuilding and Ocean equipment: Proceedings of the 2th International Scientific and Technical Conference. – Mykolaev, NUK, 504-505 [in Russian].
- [3] Kryuchkov, Yu. S. (2010). *Podvodnie lodki i ikh sozdateli* [Submarine and their designers; 1900-2010. Dramas of peoples, ships and ideas]. Nikolaev: Publishing of Torubara E.S.; Publishing “Naval” [in Russian].
- [4] Kryuchkov, Yu. S. (2008). *Prizraki v tsarstve Neptuna* [Ghosts in the Neptune kingdom]. Nikolaev: el Talisman / ChP Torubara E.S.
- [5] Berto, G. O. (1979). *Okeanograficheskie bui*: per. s angl. [Ocean's buoys]. Leningrad: Sudostroenie [in Russian].
- [6] Trunin, K. S., & Titov, S. D. (2013). *Opreделение dopolnitelnogo natyazheniya trosa pri udare postoronnego podvodnogo objekta po buksirnomu trosu v proizvolnom meste* [Determination of complementary tension rope under impact of outside underwater object up towing rope in the unspecified part of the rope] // XXI ISTC «Prikladni zavdannya matematyky ta mekhaniky – 2013», («PZMM-2013»)/ Sevastopol: SevNTU, 66-69 [in Russian].

- [7] Batuev, G. S., Golubkov, Ju. V., Efremov, A. K., & Fedosov, A. A. (1977). *Inzhenernye metody issledovaniya udarnikh protsessov* [Engineering research methods of impact processes]. Moskva: Mashinostroyeniye [in Russian].
- [8] Zhdanov, L. B. (2009). *Polnaya entsiklopediya korably i sudov* [The all encyclopedia of ships and vessels]. Reference book. – Moskva: MORKNIGA [in Russian].
- [9] Trunin, K. S. (2017). *Kompyuternaya model dinamiki morskoy privyaznoy sistemy s gibkoy svyazyu* [Computer model of MTS with FL dynamics]. Zbirnyk naukovykh prats NUK, 4 (471), 3-13 [in Russian].

Постановка задачи. Помимо столкновений буксируемых объектов с морскими обитателями часто происходят случаи столкновения отдельных элементов морских привязных систем, подводных буксируемых объектов и гибких связей данных систем с другими посторонними подводными объектами, в качестве которых могут выступать подводные лодки (ПЛ), привязные и автономные подводные аппараты, другие ПБО, различные подводные препятствия (выступающие скалы, расщелины, кораллы и др.), искусственные препятствия и объекты на дне (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. 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 [1, с. 22]. Для обозначения своего места при работе и в процессе движения аппарат буксировал на буйрепе надводный буй. 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) [1, 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), работу пришлось прекра-

тить. 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 трансатлантический кабель [1, с. 25]. 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 уравнильной цистерны. Выгородка электромашиного 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 «Викерс 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. 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 ГС МПС, подводной привязной системы (ППС) и ПБС при ударе или зацепе, а также их взаимодействия с другими подводными объектами (ПО) при возникающих аварийных режимах.

Анализ последних исследований и публикаций

При столкновениях элементов ПБС с ПО нагрузки в ГС могут увеличиваться в несколько раз, в связи с чем возникает потребность определения их максимальных значений, величин натяжения троса и создания соответствующих математических моделей. В результате неравномерного растяжения ГС и элементов их конструкций, накапливания остаточных напряжений уменьшается их прочность, что приводит к уменьшению их срока эксплуатации. Необ-

ходимо также отметить, что в процессе длительной эксплуатации канаты ПБС получали большое остаточное удлинение (до 15–20 м на 1000 м и больше) [2]. Обрыв ГС ПБС часто ведёт к потере дорогостоящих приборов и оборудования, носителями которых являются ПБО.

Вопросы, связанные с изучением воздействий различных факторов на элементы МПС и ПБС, практически не изучены. Автор осуществил поиск подобных материалов в Интернете и, к сожалению, не обнаружил вообще никаких материалов по ударному воздействию на ГС.

Как отмечал профессор, д-р техн. наук Крючков Ю.С. в работах [3, с. 400–403; 4, с. 242–245], вопросы изучения воздействия, например, подводного взрыва на ПЛ, носят, как правило, закрытый характер.

Вопросы зацепа отдельных элементов ПБС рассмотрены в [5], определение максимальных нагрузок в элементах МПС — в [6]. Как отмечается в [7, с. 3], 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. Изучение таких воздействий на ГС МПС, ППС и ПБС практически не производилось.

Предмет исследования — удар ППО по ГС (БТ) ПБС.

Объект исследования — МПС с ГС (на примере ПБС).

Методы исследования. В качестве общенаучных методов исследования использованы анализ (выделение объекта и предмета исследования), синтез (части предмета, признаки, свойства), структурирование (структурность МПС с ГС позволяет использовать комбинирование, когда элементы могут менять место в структуре и изменять качественную сторону объекта), обобщение (в качестве первичного обобщения может служить МПС как часть привязных систем (ПС), затем выделяем другие ПС — ППС, ПБС и т. п.), моделирование (изучение объекта-оригинала путем создания и исследования его копии (модели), которая обладает с оригиналом общими свойствами, интересующими нас).

В качестве эмпирических методов применены: наблюдение (фиксация наблюдаемого объекта — полученная при наблюдении информация фиксировалась, систематизировалась по различным наблюдениям за одним и тем же объектом, проведенным в разное время), опыт (проведенные ранее исследо-

вания), эксперимент (модельный при использовании разработанной компьютерной программы описания динамики ГС МПС).

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ — определение значения динамического натяжения буксирного троса при ударе по нему в произвольной части постороннего подводного объекта с помощью разработанной компьютерной программы описания динамики МПС с ГС.

Основной материал. Рассмотрим случай, когда при буксировке ПБО, в качестве которого рассматривается привязной подводный аппарат (например, искатель-уничтожитель донных мин), происходит столкновение, например, спасательного подводного аппарата, движущегося встречным курсом под водой, с буксирным тросом в произвольном месте.

Полагаем, что система «надводный буксировщик–буксирный трос–буксируемый подводный объект» движется с постоянной скоростью V_{01} . В качестве судна-буксировщика на рис. 1 изображён морской тральщик (МТЩ) пр. 266М, а в качестве ППО — спасательный ПА пр. 1855 [8, с. 244].

В некоторый момент времени, который принимаем за начало отсчёта ($t = 0$) по тросу ударяет тело массой m_2 (посторонний подводный объект – ППО), движущееся навстречу со скоростью V_{02} (рис. 2). Удар ППО происходит по буксирному тросу в произвольном месте. Равновесное состояние системы меняется, происходит произвольное отклонение состояния системы от положения равновесия.

Несмотря на удар ППО по буксирному тросу ПБС продолжает двигаться. Глубина подводного буксируемого аппарата (ПБА) уменьшается за счёт скольжения буксирного троса по ППО в результате продолжающегося движения ПБС. При этом глубина погружения ППО также может измениться. Если ПБА имеет обтекаемые формы (и не имеет выступающих частей: приборов, гребных электродвигателей, ограждений и т. п.), буксирный трос просто соскользнет по корпусу ПБА и пройдёт мимо.

Это будет идеальным случаем столкновения без разрушения двух соударяющихся тел. Хотя в этом случае 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. В зависимости от скорости буксировки ПБА (а также массы судна-буксировщика) и скорости движения ППО в момент удара возможны либо кратковре-

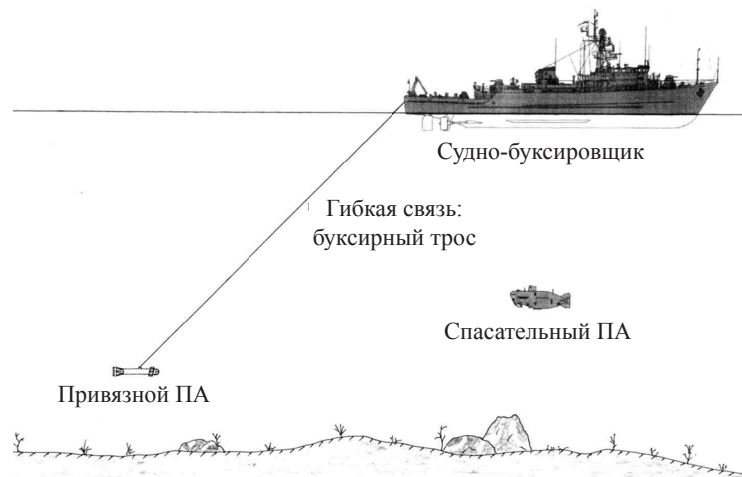


Рис. 1. Схема системы «надводный буксировщик–буксирный трос–подводный буксируемый объект» в момент буксировки (до удара по тросу ППО)

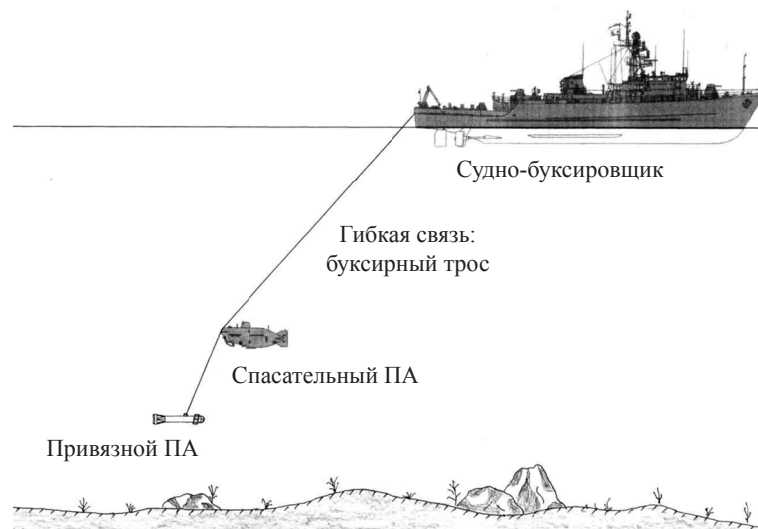


Рис. 2. Схема системы «надводный буксировщик–буксирный трос–подводный буксируемый объект» в момент удара встречного ПО по буксирному тросу в произвольном месте

менный 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 ПБА. При этом возможно запутывание буксирного троса, изменение его формы, обрыв. Это потребует остановки судна-буксировщика, подъёма ПБА и ППО, если позволит мощность лебёдки судна-буксировщика, распутывания буксирного троса, ремонта ПБС, что в результате приведёт к невыполнению задания. В случае, если масса встречного ППО 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 ПЛ попала в его трал. Буквально за

считанные минуты сейнер был потоплен, погибли несколько рыбаков. Подводной лодке удалось освободиться от трала, при этом военно-морским флотом США всячески отрицалось участие в столкновении ПЛ ВМС США.

На рис. 3 приведена схема действия сил в системе до и после удара ППО по буксирному тросу [6].

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 [6]

$$m x_{t,t} = -T_1 \cos(\alpha_1) + T_2 \cos(\alpha_2),$$

$$m y_{t,t} = -T_1 \sin(\alpha_1) - T_2 \sin(\alpha_2) + m g,$$

где T_1, T_2 — натяжения в ветвях троса; α_1, α_2 — углы наклона концов троса.

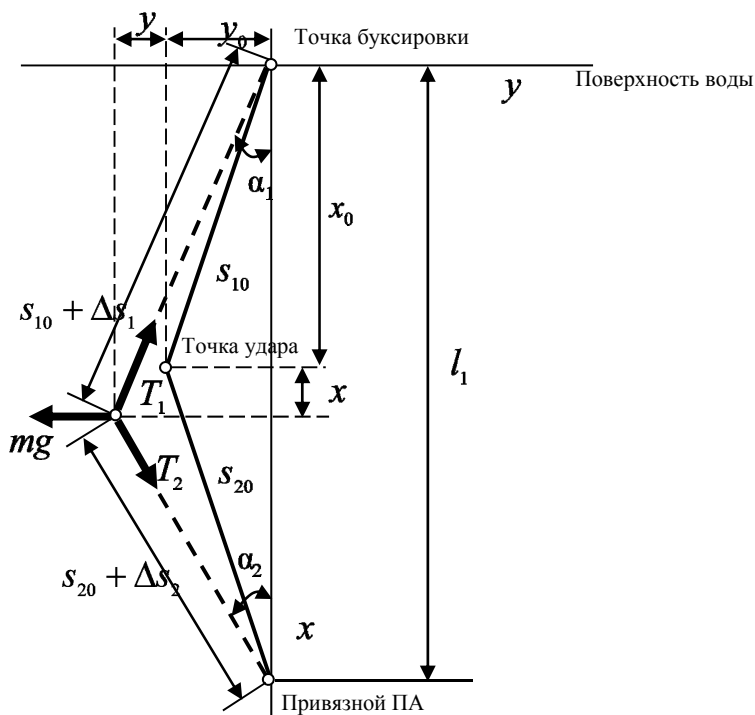


Рис. 3. Схема действия сил в системе до и после удара ППО по буксирному тросу:

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} — соответственно верхняя и нижняя длины буксирного троса до удара; $\Delta s_1, \Delta s_2$ — приращения длин верхней и нижней частей троса после удара соответственно; α_1, α_2 — углы наклона соответственно верхней и нижней частей троса после удара; T_1, T_2 — усилия натяжения в верхней и нижней частях троса после удара соответственно; T_{10}, T_{20} — стартовые натяжения соответственно верхней и нижней частей троса по отношению к точке удара; $\Delta T_1, \Delta T_2$ — приращения T_1 и T_2 соответственно после удара

Натяжения в ветвях троса

$$T_1 = T_{10} + \Delta T_1;$$

$$T_2 = T_{20} + \Delta T_2.$$

Подстановка этих натяжений в дифференциальные уравнения движения с последующим разложением в ряд Маклорена и сохранением линейных слагаемых позволяет получить уравнения

$$\begin{aligned} mx_{t,t} = & -\frac{xT_{10}}{s_{10}} + \frac{l_1 T_{20}}{s_{20}} - \frac{T_{10} x_0}{s_{10}} - \frac{T_{20} x_0}{s_{20}} + \\ & + \left(\frac{l_1}{s_{20}} - \frac{x}{s_{20}} - \frac{x_0}{s_{20}} \right) \Delta T_2 + \left(\frac{T_{20} x_0}{s_{20}^2} - \frac{l_1 T_{20}}{s_{20}^2} + \right. \\ & + \left. \frac{xT_{20}}{s_{20}^2} \right) \Delta s_2 + \left(-\frac{x}{s_{10}} - \frac{x_0}{s_{10}} \right) \Delta T_1 + \left(\frac{T_{10} x_0}{s_{10}^2} + \right. \\ & + \left. \frac{xT_{10}}{s_{10}^2} \right) \Delta s_1 - \frac{T_{10}(y_0 + y)}{s_{10}} + gm + \frac{T_{20}(y_0 + y)}{s_{10}^2} + \\ & + \frac{T_{10}(y_0 + y)\Delta s_1}{s} - \frac{T_{20}(y_0 + y)\Delta s_2}{s_{20}^2} - \end{aligned}$$

$$-\frac{\Delta T_1(y_0 + y)}{s_{10}} + \frac{\Delta T_2(y_0 + y)}{s_{20}};$$

$$\begin{aligned} my_{t,t} = & gm - \frac{yT_{10}}{s_{10}} + \frac{T_{20}y_0}{s_{20}} - \frac{T_{10}y_0}{s_{10}} + \frac{yT_{20}}{s_{20}} + \\ & + \left(\frac{y}{s_{20}} + \frac{y_0}{s_{20}} \right) \Delta T_2 + \left(-\frac{yT_{20}}{s_{20}^2} - \frac{T_{20}y_0}{s_{20}^2} \right) \Delta s_2 + \\ & + \left(-\frac{y}{s_{10}} - \frac{y_0}{s_{10}} \right) \Delta T_1 + \left(\frac{T_{10}y_0}{s_{10}^2} + \frac{yT_{10}}{s_{10}^2} \right) \Delta s_1. \end{aligned}$$

Учитывая удлинения ветвей и очевидные геометрические соотношения, статические натяжения находим как решение системы уравнений

$$\begin{aligned} -\frac{xT_{10}}{s_{10}} + \frac{l_1 T_{20}}{s_{20}} - \frac{T_{10} x_0}{s_{10}} - \frac{xT_{20}}{s_{20}} - \frac{T_{20} x_0}{s_{20}} = & 0; \\ gm = & \frac{yT_{10}}{s_{10}} - \frac{T_{10}y_0}{s_{10}} + \frac{yT_{20}}{s_{20}} + \frac{T_{20}y_0}{s_{20}}. \end{aligned}$$

Имеем

$$T_{10} = -\frac{gms_{10}(-l_1 + x_0 + x)}{2x_0y_0 + 2xy_0 + l_1y - l_1y_0};$$

$$T_{20} = \frac{s_{20}mg(x_0 + x)}{2x_0y_0 + 2xy_0 + l_1y - l_1y_0}.$$

Окончательно уравнения движения принимают вид

$$x_{t,t} + a_{11}x + a_{12}y = 0;$$

$$y_{t,t} + a_{21}x + a_{22}y = 0,$$

где

$$a_{11} = \frac{y_0^2}{m} \left(\frac{T_{10}}{s_{10}^3} + \frac{T_{20}}{s_{20}^3} \right) + \frac{EF}{m} \left(\frac{x_0^2}{s_{10}^3} + \frac{(l_1 - x_0)^2}{s_{20}^3} \right);$$

$$a_{12} = a_{21} = \frac{EFy_0}{m} \left(\frac{x_0}{s_{10}^3} - \frac{(l_1 - x_0)}{s_{20}^3} \right) - \frac{y_0}{m} \left(\frac{T_{10}x_0}{s_{10}^3} - \frac{T_{20}(l_1 - x_0)}{s_{20}^3} \right);$$

$$a_{22} = \frac{1}{m} \left(\frac{T_{10}x_0^2}{s_{10}^3} + \frac{T_{20}(l_1 - x_0)^2}{s_{20}^3} \right) + \frac{EFy_0^2}{m} \left(\frac{1}{s_{10}^3} + \frac{1}{s_{20}^3} \right).$$

Частоты колебаний для $x(t) = A\sin(pt)$, $y(t) = B\sin(pt)$:

$$p_{1,2} = \sqrt{\frac{a_{11} + a_{22}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_{11} - a_{22}}{2}\right)^2 + a_{12}^2}}.$$

Последовательная линеаризация уравнений модели позволила получить удобные для практических расчетов выражения движения, усилий натяжения в ветвях и частоты колебаний буксировочного троса. Научная новизна данного подхода заключается в определении значений натяжений T_1 и T_2 в ветвях

троса при ударе по нему ППО в произвольном месте, углов наклона α_1 и α_2 концов троса, частоты колебаний $p_{1,2}$ для уравнений $x(t)$ и $y(t)$.

Для проверки применимости разработанной компьютерной модели описания динамики МПС с ГС [9] для данной задачи принимаем следующие параметры МПС: длина ГС 100 м, её диаметр 14 мм, модуль Юнга $9,55 \cdot 10^8$ 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. Гибкая связь расположена вертикально и имеет форму прямой линии. Её натяжение T равно нулю.

Судно-носитель и подводный аппарат могут перемещаться в пространстве в результате столкновения с объектом массой m_2 (морским животным, рыбой, моллюском или 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.

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 направлениях. Результаты математического моделирования показывают, что форма ГС в процессе взаимодействия с ППО существенно зависит от положения точки удара.

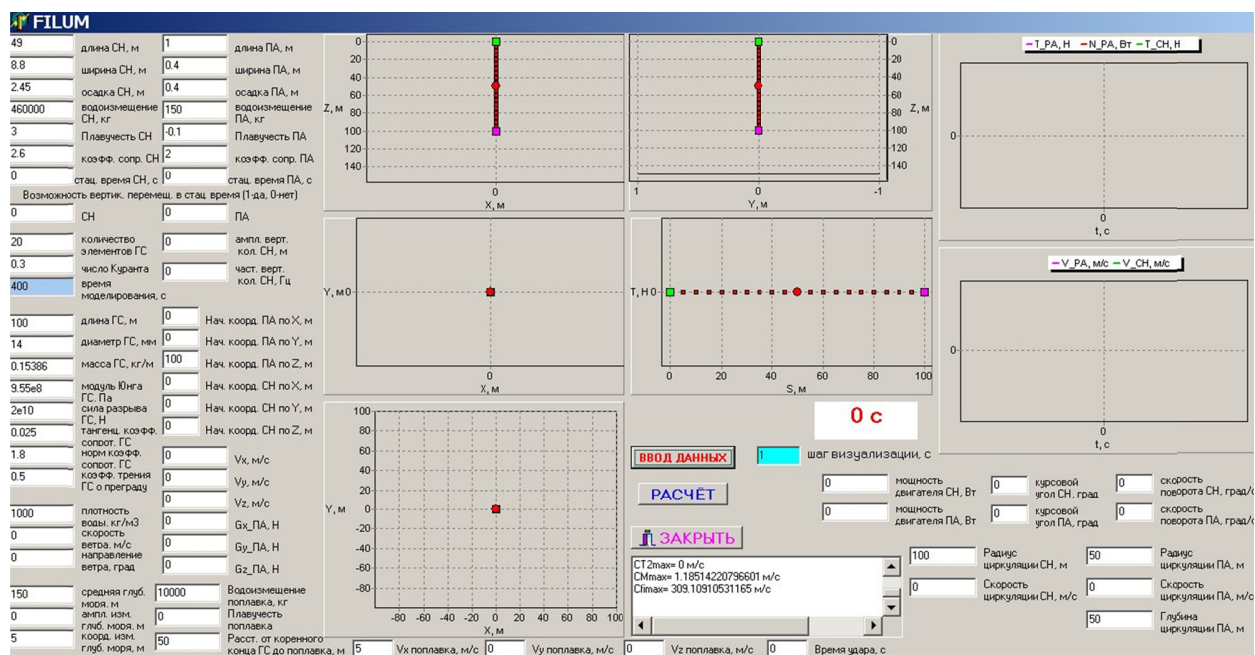
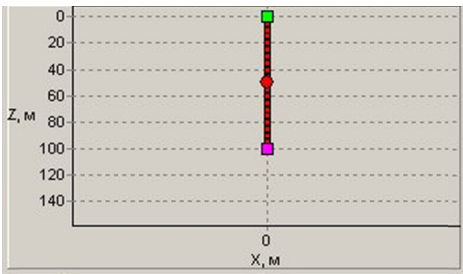
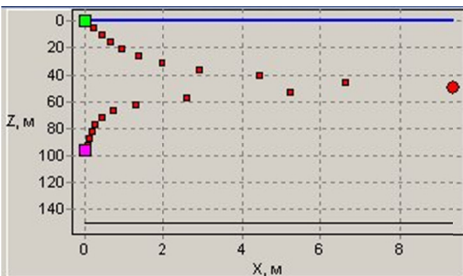
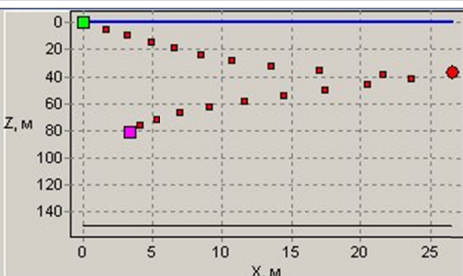
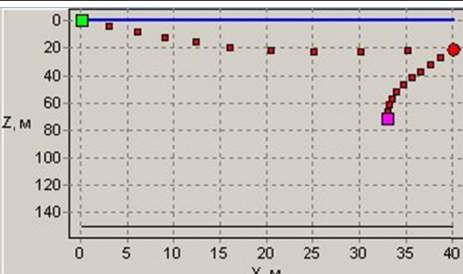
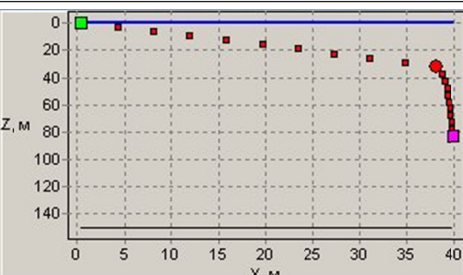


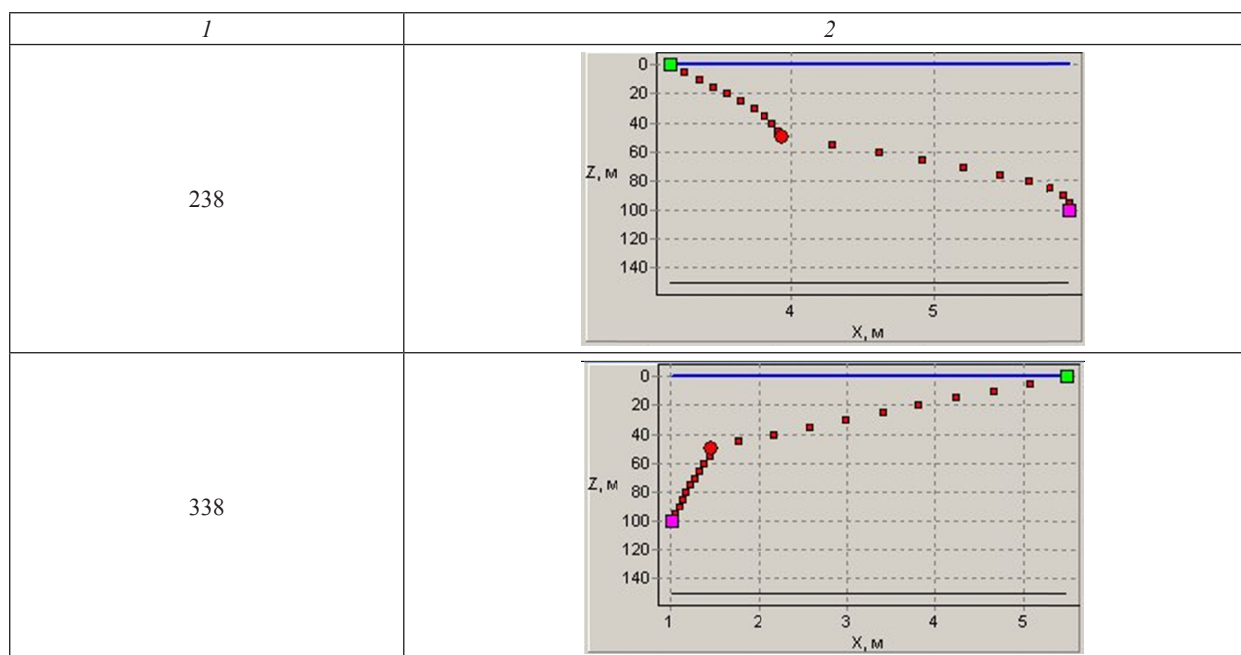
Рис. 4. Начальный вид окна программы

Для случая 1 в табл. 1 приведены этапы изменения формы ГС в результате удара по ней на расстоянии 50 метров от СН и ПА.

Таблица 1. Изменение формы ГС ПБС в процессе моделирования (случай 1)

Момент времени, с <i>1</i>	Форма ГС при моделировании <i>2</i>
0	
2	
12	
26	
59	
92	

Окончание Таблицы 1.



Из табл. 1 следует, что разная масса и размеры СН и ПА приводят к всплытию морского объекта на глубину от 50 до 20 метров и последующему погружению в результате его торможения СН.

В дальнейшем морской объект изменяет направление своего движения на противоположное, подтягивая за собой ПА. Гибкая связь получает наибольшее натяжение 4,1 кН возле СН (рис. 5).

Судно-носитель к 338 секунде также получает перемещение 5,5 м. Подводный аппарат 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 (см. табл. 1 и рис. 6), а также силовое воздействие на СН и ПА (рис. 6).

Для случая 2 в табл. 2 приведены этапы изменения формы ГС в результате удара по ней на расстоянии 25 метров от СН.

На рис. 7 и 8 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.

Для случая 3 в табл. 3 показано изменение формы ГС в результате удара по ней на расстоянии 75 метров от СН. Смещение точки удара морского объекта по ГС в сторону ПА (на расстоянии 75 м от СН) существенно изменяет кинематику движения МПС (см. табл. 2 и рис. 9). То же происходит и для силового воздействия на СН и ПА (рис. 10). 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. 11).

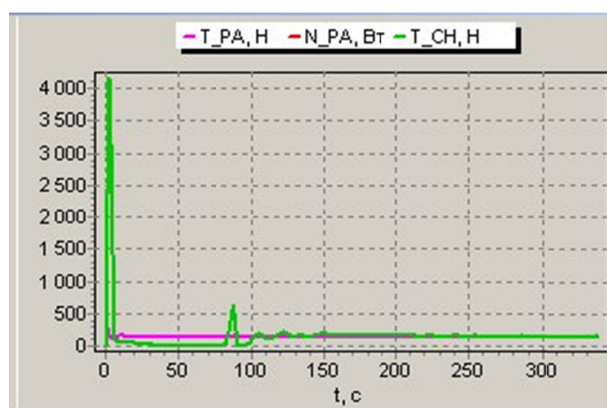


Рис. 5. Изменение силы натяжения ГС возле СН и ПА в результате удара по ней на расстоянии 50 метров от СН и ПА

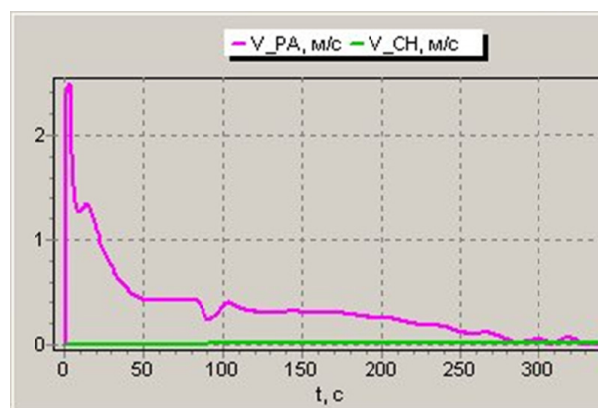
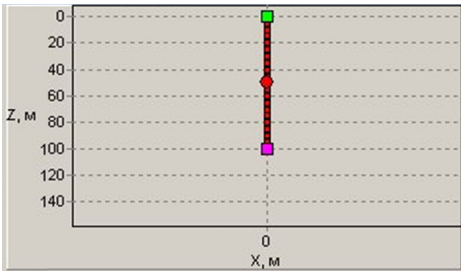
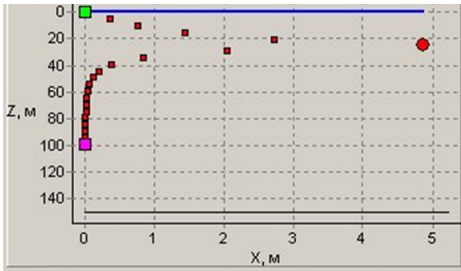
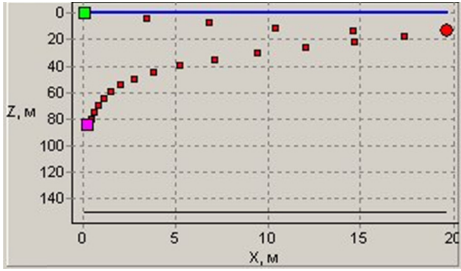
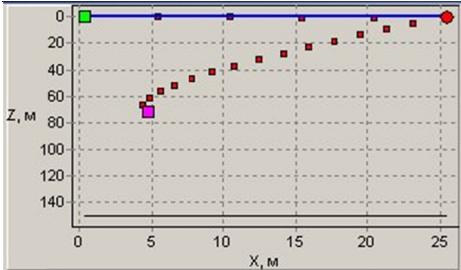
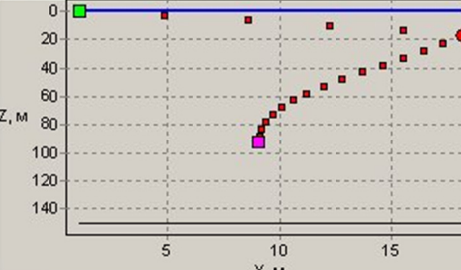
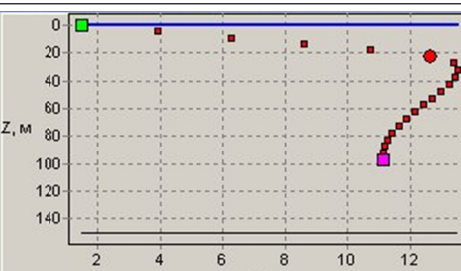


Рис. 6. Изменение модуля скорости СН и ПА в результате удара по ГС на расстоянии 50 метров от СН и ПА

Таблица 2. Изменение формы ГС ПБС в процессе моделирования (случай 2)

Момент времени, с <i>t</i>	Форма ГС при моделировании <i>2</i>
0	
1	
8	
20	
40	
50	

Окончание Таблицы 2.

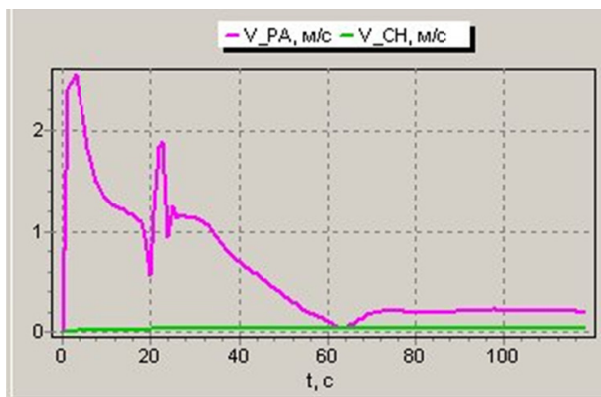
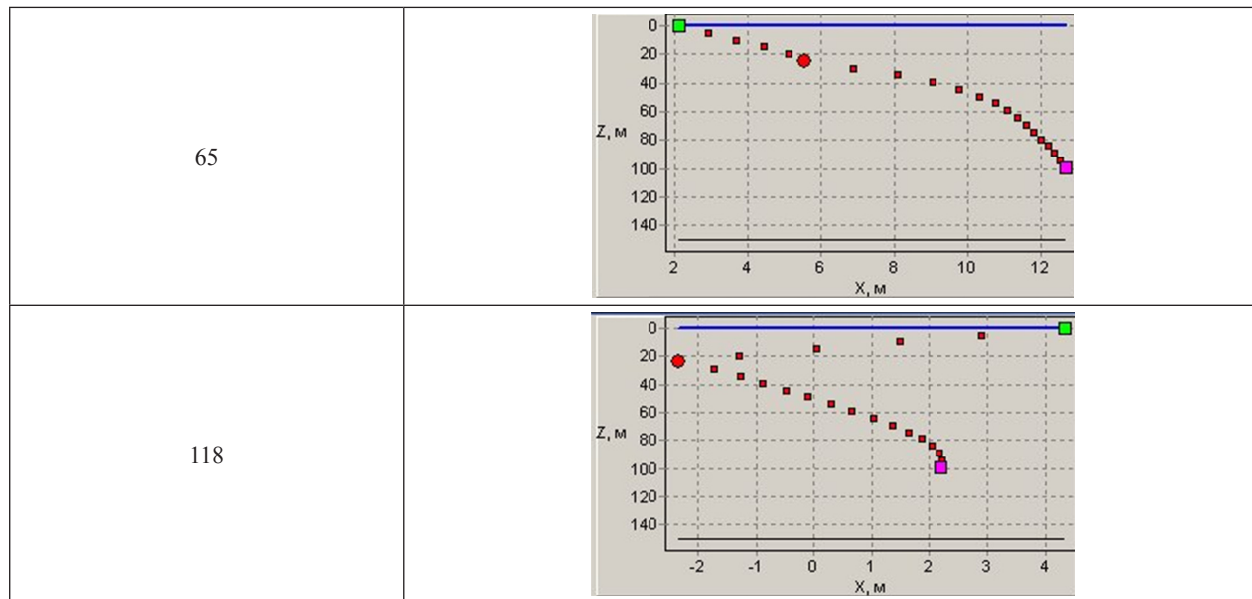


Рис. 7. Изменение модуля скорости СН и ПА в результате удара по ГС на расстоянии 25 метров от СН

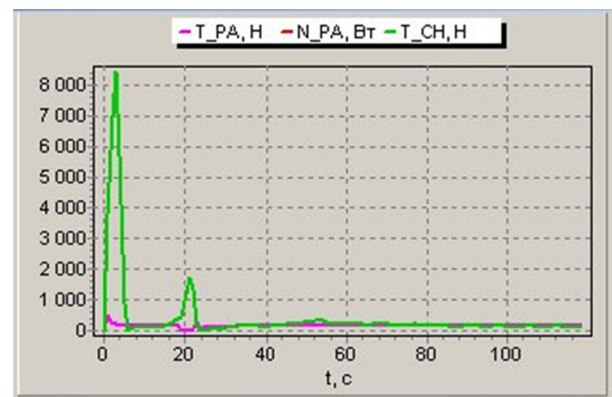


Рис. 8. Изменение силы натяжения ГС возле СН и ПА в результате удара по ней на расстоянии 25 метров от СН

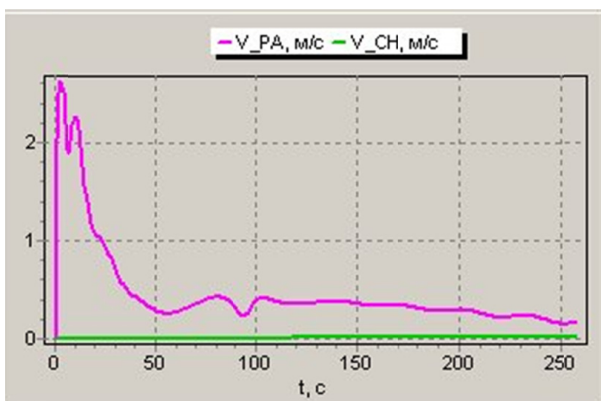


Рис. 9. Изменение модуля скорости СН и ПА в результате удара по ГС на расстоянии 75 метров от СН

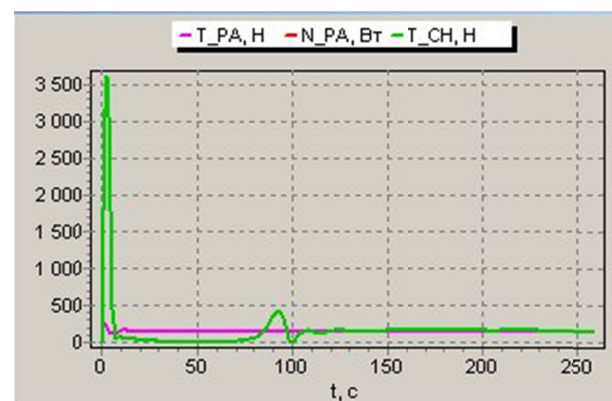
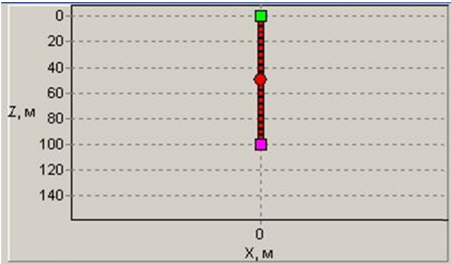
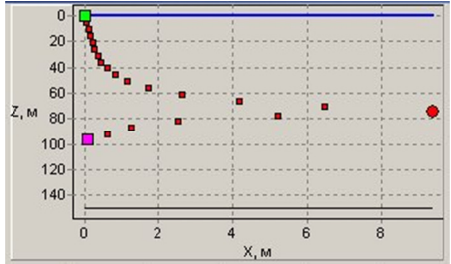
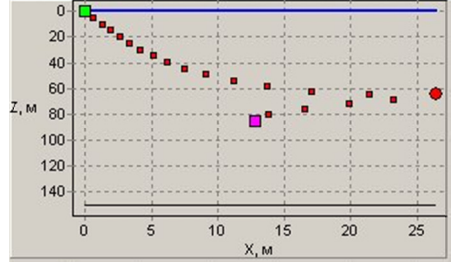
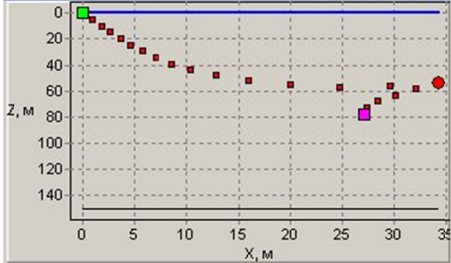
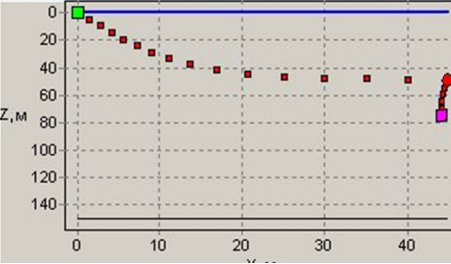
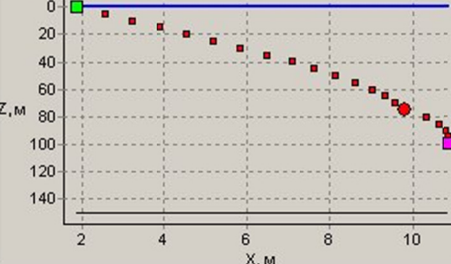


Рис. 10. Изменение силы натяжения ГС возле СН и ПА в результате удара по ней на расстоянии 75 метров от СН

Таблица 3. Изменение формы ГС ПБС в процессе моделирования (случай 3)

Момент времени, с <i>t</i>	Форма ГС при моделировании <i>2</i>
0	
2	
11	
22	
64	
216	

Окончание Таблицы 3.

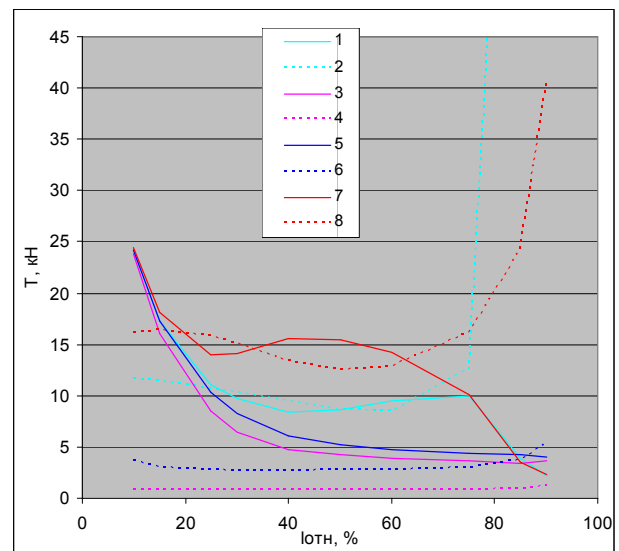
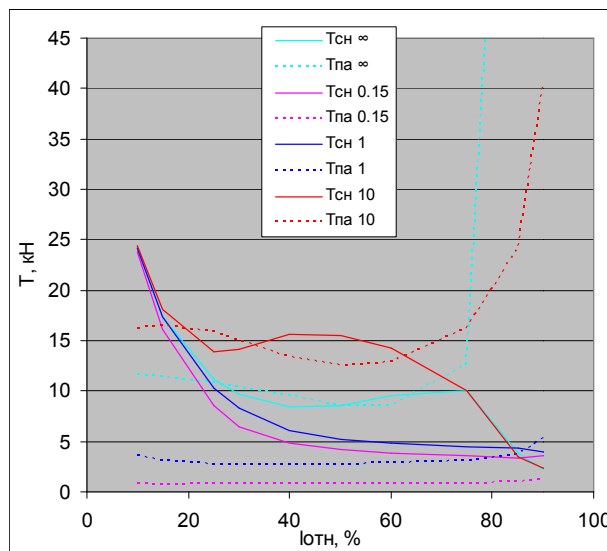
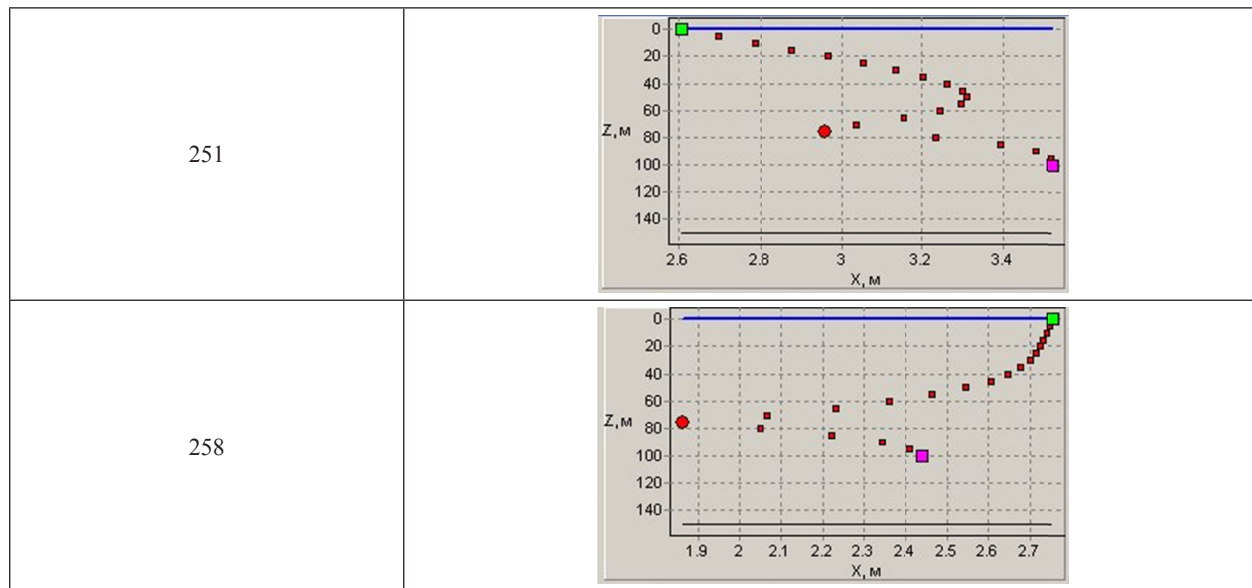


Рис. 11. Зависимость силы натяжения ГС от относительного расстояния от СН: сплошные линии — натяжение коренного конца ГС (возле СН), пунктирные — ходового; линии 1 и 2 — СН и ПА неподвижны; 3 и 4 — масса ПА 0,15 т; 5 и 6 — масса ПА 1 т; 7 и 8 — масса ПА 10 т

Обсуждение полученных результатов. 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 немономонному изменению натяжения коренного конца ГС. В дальнейших исследованиях планируется рассмотреть применимость (универсальность) разработанной математической и компьютерной моделей описания динамики МПС с ГС для неавтономных привязных объектов (буёв нейтральной плавучести).

ВЫВОДЫ. Научная новизна данного исследования заключается в том, что, используя разработанную компьютерную модель динамики МПС с ГС для ПБС, можно определить модули скорости СН и ПА при ударе по нему ППО в произвольном месте, что позволяет усовершенствовать методику проектирования МПС с ГС и ПБС в условиях ударных нагрузок при аварийных режимах.

Список литературы

- [1] Юрнев, А. П. (1986). *Аварии под водой*. Ленинград: Судостроение
- [2] Трунин, К. С. (2011). Определение максимальных нагрузок в элементах подводных буксируемых систем при аварийных режимах эксплуатации. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали II Міжнарод. наук.-техн. конф. Миколаїв: НУК. 504-505.
- [3] Крючков, Ю. С. (2010). *Подводные лодки и их создатели: 1900-2000 гг. Драмы людей, кораблей и идей*. Николаев: Издательство Торубары Е.С.; Издательство «Наваль».
- [4] Крючков, Ю. С. (2008). *Призраки в царстве Нептуна*. Николаев: el Talisman / ЧП Торубара Е.С..
- [5] Берто, Г. (1979). *Океанографические буи*. Ленинград: Судостроение.
- [6] Трунин, К. С., & Титов, С. Д. (2013). Определение дополнительного натяжения троса при ударе постороннего подводного объекта по буксирному тросу в произвольном месте. *Прикладні завдання математики*: матеріали XXI Міжнарод. наук.-техн. конф. Севастополь: СевНТУ, 66-69.
- [7] Батуев, Г. С., Голубков, Ю. В., Ефремов, А. К., & Федосов, А. А. (1977). *Инженерные методы исследования ударных процессов*. Москва, Машиностроение.
- [8] Жданов, Л. Б. (2009). *Полная энциклопедия кораблей и судов*. Справочное издание. Москва: МОРКНИГА.
- [9] Трунин, К. С. (2017). Компьютерная модель динамики морской привязной системы с гибкой связью. *Збірник наукових праць НУК*, 4 (471), 3-13

© К. С. Трунін

Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук, проф. В. С. Блінцов