

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ
имени адмирала С.О. Макарова

На правах рукописи

УДК 629.5.01:629.584

Крептюк Антонина Викторовна

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОРОИДАЛЬНЫХ КОРПУСОВ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Специальность 05.08.03 – конструирование и строительство судов

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Бурдун Евгений Тимофеевич
канд. техн. наук, доцент

Перший примірник дисертації ідентичний
за змістом з іншими примірниками дисертації

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 38.060.02
д.т.н., професор

Л.І. Коростильов

Николаев - 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	9
<i>Раздел 1</i> СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОЧНЫХ КОРПУСОВ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ И КОНСТРУКЦИЙ.....	17
1.1 Анализ существующих и перспективных форм прочных корпусов подводных технических средств освоения океана.....	17
1.2 Технические требования к проектированию прочных корпусов...	24
1.3 Метод намотки в производстве прочных корпусов из полимерных композиционных материалов.....	30
1.4 Обзор работ по исследованию устойчивости замкнутых изотропных и ортотропных тороидальных оболочек под действием внешнего равномерного давления.....	45
1.5 Постановка задач научного исследования.....	55
<i>Раздел 2</i> ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ТОРОИДАЛЬНЫХ ПРОЧНЫХ КОРПУСОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ НАМОТКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	57
2.1 Конструктивно-технологический анализ намотки тороидальных прочных корпусов.....	57
2.2 Выбор расчетной модели структуры стенки композитного тороидального прочного корпуса, выполненного намоткой.....	64
2.3 Анализ распределения эффективных упругих постоянных многослойного композитного образца в зависимости от технологической схемы намотки.....	67
2.4 Выводы по разделу.....	78

<i>Раздел 3</i> УСТОЙЧИВОСТЬ ТОРОИДАЛЬНОГО ПРОЧНОГО КОРПУСА, ВЫПОЛНЕННОГО НАМОТКОЙ, ПРИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ	79
3.1 Подходы и особенности расчета намотанных тонкостенных композитных конструкций.....	79
3.2 Выбор основного критерия устойчивости тороидального прочного корпуса.....	80
3.3 Общая методика расчета верхнего критического давления потери устойчивости при гидростатическом сжатии тороидального прочного корпуса, выполненного намоткой из композиционных материалов.....	82
3.4 Выводы по разделу.....	95

<i>Раздел 4</i> ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТОРОИДАЛЬНОГО ПРОЧНОГО КОРПУСА, ВЫПОЛНЕННОГО НАМОТКОЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	96
4.1 Влияние схемы намотки и учета переменной толщины тороидального прочного корпуса, выполненного намоткой из композиционных материалов, на величину верхнего критического давления.....	96
4.2 Анализ влияния упругих свойств различных конструкционных материалов на величину верхнего критического давления потери устойчивости при гидростатическом сжатии	100
4.3 Выводы по разделу.....	103

<i>Раздел 5</i> ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОРОИДАЛЬНОГО ПРОЧНОГО КОРПУСА ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....	105
5.1 Анализ влияния физико-механических свойств различных конструкционных материалов и геометрии тороидального	

прочного корпуса на его массогабаритные показатели с позиции потери устойчивости.....	105
5.2 Прочность и рациональное проектирование тороидального прочного корпуса из композиционных материалов для подводных аппаратов.....	113
5.3 Оценка технико-экономической эффективности применения углепластика и стеклопластика для тороидальных прочных корпусов подводной техники.....	121
5.4 Выводы по разделу.....	123
 ВЫВОДЫ.....	 125
 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	 128
 Приложение А. Методика разработки схемы армирования прочного тороидального корпуса из полимерных композиционных материалов с позиции потери устойчивости и прочности	 146
 Приложение Б. Акты внедрения результатов диссертационной работы.....	 159

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

p	– гидростатическое давление
q	– верхнее критическое давление потери устойчивости
$m_{\text{ПК}}$	– масса прочного корпуса
m_w	– водоизмещение прочного корпуса
ρ_w	– плотность морской воды
h_{sw}	– расчетная глубина погружения
H_{sw}	– рабочая глубина погружения
f_s	– коэффициент безопасности
h_m	– постоянная осредненная по меридиану намотанного тороидального прочного корпуса толщина
Δ_m	– относительная осредненная по меридиану толщина корпуса
h	– толщина изотропного корпуса
a	– внутренний радиус круглого поперечного сечения тороида
R	– расстояние от оси вращения до центра меридиального сечения тороида
k	– параметр, характеризующий геометрию тороида
r_0	– максимальный радиус вращения тороида
r	– расстояние от оси вращения до некоторой точки срединной замкнутой тороидальной поверхности
θ	– полярный угол в плоскости меридиана круговой полной тороидальной оболочки
ψ	– угол в плоскости параллельного круга тороидальной оболочки
h_{max}	– наибольшая толщина стенки тороидального прочного корпуса, выполненного намоткой из ПКМ
h_{min}	– наименьшая толщина стенки тороидального прочного корпуса, выполненного намоткой из ПКМ

E_{θ}	– модуль упругости многослойного ортотропного ПКМ в меридиальном направлениях
E_{ψ}	– модуль упругости многослойного ортотропного ПКМ в продольном направлении
$E_{1м}$	– модуль упругости монослоя вдоль армирования
$E_{2м}$	– модуль упругости монослоя поперек армирования
$\mu_{21м}$	– коэффициент Пуассона монослоя
E_B	– модуль упругости армирующего материала
E_M	– модуль упругости связующего
μ_B	– коэффициент Пуассона армирующего материала
μ_M	– коэффициент Пуассона связующего
η	– коэффициент объемного содержания армирующего материала
$q_C^{ППН}$	– верхнее критическое давление потери устойчивости для тороидального корпуса, выполненного продольно-поперечной намоткой, на основе дискретной расчетной модели с осредненной постоянной толщиной монослоев
$q_V^{ППН}$	– верхнее критическое давление потери устойчивости для тороидального корпуса, выполненного продольно-поперечной намоткой, на основе дискретной расчетной модели, учитывающей переменность толщины по меридиану
$q_C^{СН}$	– верхнее критическое давление потери устойчивости для тороидального корпуса, выполненного перекрестной спиральной намоткой, на основе дискретной расчетной модели с осредненной постоянной толщиной монослоев
n	– количество полуволн потери устойчивости по меридиану
h_1	– толщина однонаправленного КМ (армирующей ленты)
φ	– угол армирования (намотки)
φ_0	– угол армирования на максимальном радиусе (экваторе) тороида кругового поперечного сечения

$h_{SG}(\theta, k)$	– толщина монослоя по меридиану для спиральной геодезической намотки
φ_{0G}	– начальный угол геодезической намотки для тороидальных оболочек кругового поперечного сечения
$h_{SR}(\theta, k)$	– толщина монослоя по меридиану при равновесной схеме армирования
$h_{\Pi}(\theta, k)$	– толщина поперечного монослоя, уложенного вдоль меридиана
δ	– параметр, показывающий во сколько раз поперечных монослоев больше продольных
l_1	– количество продольных монослоев
l_2	– количество дополнительных поперечных монослоев
l_{φ}	– количество парных монослоев, уложенных при перекрестной симметричной намотке
$h_{\Pi m}$	– осредненная постоянная толщина поперечного монослоя
h_{SGm}	– осредненная постоянная толщина монослоя для спиральной геодезической намотки
$\varphi_G(\theta, k)$	– угол намотки на круговом торе по геодезической линии
$\varphi_R(\theta, k)$	– угол намотки на круговом торе по равновесной кривой
$v(\theta)$	– тангенциальное перемещение срединной поверхности тороида вдоль угловой координаты θ
$\omega(\theta)$	– радиальное перемещение по радиусу меридионального сечения тороида
F_{1t}	– предел прочности монослоя в направлении армирования при растяжении
F_{1c}	– предел прочности монослоя в направлении армирования при сжатии
F_{2c}	– предел прочности монослоя в поперечном направлении при сжатии
$F_{\theta c}$	– предел прочности КМ при сжатии в поперечном

	направлении
$F_{\psi c}$	– предел прочности КМ при сжатии в продольном направлении
$\sigma_{\theta}(\theta)$	– кольцевые напряжения в слоистом КМ
$\sigma_{\psi}(\theta)$	– продольные напряжения в слоистом КМ
УП	– углепластик
СП	– стеклопластик
ПКМ	– полимерный композиционный материал
ПК	– прочный корпус
ПА	– подводный аппарат

ВВЕДЕНИЕ

Диссертация посвящена решению актуального научно-технического задания в области конструирования и строительства подводной техники - созданию теоретического обеспечения для проектирования тороидальных прочных корпусов, а именно, несущей оболочки прочного корпуса в форме тороида. Развитием идеи подводных технических средств освоения океана с главным прочным корпусом тороидальной формы является деятельность в направлении создания разнообразных схем и компоновок подводных конструкций и аппаратов с тороидальным прочным корпусом, поиск путей обеспечения эффективности такой техники для освоения океана.

Создание прочных корпусов (ПК), которые имеют достаточную прочность и устойчивость при минимальном весе, является одной из проблем освоения больших глубин океана от 3000 м до 6000 м, которые составляют 72% площади мирового океана. В настоящее время одним из перспективных путей снижения массы ПК рядом с обеспечением высоких эксплуатационных показателей является их формообразование методом автоматизированной намотки из однонаправленных композиционных материалов (КМ) – стеклопластика (СП) или углепластика (УП), что подтверждается рядом уже построенных и введенных в эксплуатацию подводных аппаратов с композитными прочными корпусами.

С появлением оригинальных эскизных проектов подводных аппаратов, лабораторий и подводных буровых платформ с тороидальным прочным корпусом возникают вопросы их эффективности и возможности реализации благодаря отработанной технологии изготовления тороидальных баллонов давления методом намотки из КМ в промышленном масштабе. Следует отметить, что изготовление тороидальных прочных корпусов методом намотки из армированных пластиков оказывается технологически более простой процедурой, чем создание аналогичной конструкции из металлов.

На сегодня работы по тороидальным оболочкам, как несущим оболочкам прочных корпусов, описывают лишь либо варианты оригинальных

архитектурно-конструктивных компоновок внешнего вида подводных аппаратов и конструкций с прочными корпусами в форме тороида, либо сконцентрированы на исследовании напряженно-деформированного состояния и устойчивости изотропных и ортотропных тороидальных оболочек, нагруженных внешним равномерным давлением, без учета конструктивно-технологических особенностей их изготовления (О. Махнинг, П.Ф. Джордан, Л.Х. Собел, В. Флюгге, Ю.А. Федосов, А.В. Нетребко, К. Ф. Черных, В. А. Шамина, Т. И. Кошелева, В. И. Гуляев, В.В. Гайдайчук, Н. А. Чаплин, Я. М. Григоренко, М. С. Ганеева, Л. А. Косолапова, А. С. Вольмир, К. З. Хайрнасов, Г. С. Погосян, J. Blachut и другие). Результатов этих исследований недостаточно для дальнейшего совершенствования технических решений при проектировании тороидального прочного корпуса, поскольку применение КМ требует нового подхода к проектированию несущей оболочки прочного корпуса в форме замкнутого тороида с учетом конструктивно-технологических особенностей при изготовлении ее методом намотки.

Вопрос рационального проектирования тороидального ПК в условиях комплексного подхода при разрешении противоречивых требований прочности, устойчивости, технологичности и минимума массы не рассматривался, как и оценка конкурентоспособности ПК в форме тороида для подводной техники по сравнению с корпусами традиционных форм (цилиндра и сферы) и эффективность внедрения ПКМ как конструкционных материалов для ПК. Поэтому решение этих проблем в диссертационной работе является актуальным.

Актуальность темы диссертации обусловлена также:

- мировыми тенденциями в судостроении относительно широкого внедрения технологий изготовления корпусных конструкций из полимерных композиционных материалов;
- благоприятными условиями для увеличения объемов использования и внедрения композиционных материалов в судостроении в Украине;

– заданиями, поставленными в Концепции Общегосударственной целевой экономической программы развития кораблестроения на период до 2035 года от 06.05.2009 № 671-р., Концепции развития транспортно-дорожного комплекса Украины на среднесрочный период и до 2020 года, Морской Доктрине Украины на период до 2035 года (постановление Кабинета Министров Украины от 7.10.2009 №1307), законе Украины от 06.09.2012 № 5209-17 «Про проведення економічного експерименту щодо державної підтримки суднобудівної промисловості», законе Украины № 2519-17 от 9.09.2010 р. «Про внесення змін до Закону України "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» и постановлении Кабинета Министров Украины № 942 от 7.09.2011 р. «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року», в которых одним из направлений является переход к модели инновационного развития судостроения Украины путем внедрения новых материалов и освоения новых технологий строительства судов.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертация включает результаты исследований, проведенных в Национальном университете кораблестроения имени адмирала Макарова Министерства образования и науки Украины по госбюджетной научно-исследовательской теме №1579 "Разработка методов исследования и расчета нелинейных вероятностных квазистатических и динамических нагрузок и деформации корпусов судов в экстремальных штормовых условиях" (2006 г., номер государственной регистрации 0106U000829) и НИР №1715 "Разработка методов проектирования судовых конструкций из полимерных композиционных материалов при статичных и динамических нагрузках" (2009 – 2010 гг., номер государственной регистрации 0109U002221), где соискатель участвовал как исполнитель.

Цель и задачи исследования. *Целью работы* является разработка методики проектирования рациональных в весовом и технологическом отношениях прочных корпусов в форме тороида из армированных

композиционных материалов в комплексе совместного решения задач прочности и устойчивости при гидростатическом сжатии для назначения их проектных параметров на стадии создания на базе них концепта подводного технического средства.

Задачи исследования. Достижение поставленной цели предусматривает:

1. Определение современного состояния проблем проектирования тороидальных прочных корпусов из полимерных композиционных материалов для подводных аппаратов и конструкций; постановка задач исследования.

2. Теоретическое обоснование и разработка математической модели потери устойчивости при гидростатическом сжатии полученной методом намотки из однонаправленных композиционных материалов замкнутой круговой тороидальной оболочки, которая бы учитывала слоистую структуру полимерного композиционного материала и переменность толщины в намотанном тороиде; выбор метода решения задачи устойчивости.

3. Получение аналитического решения для верхнего критического давления потери устойчивости тороидального прочного корпуса при гидростатическом сжатии, на базе которого выявить его зависимость от схемы намотки, геометрических параметров тороида, перспективных типов армирующего наполнителя и связующего, переменности толщины намотанного корпуса.

4. Разработка расчетной аналитической методики проектирования тороидального прочного корпуса для подводных аппаратов при ограничении по прочности и устойчивости при гидростатическом сжатии, которая включает возможность выбора связующих, однонаправленных наполнителей и схем армирования с целью конструирования рациональной структуры полимерного композиционного материала; ее апробация на тестовых примерах.

5. Оценка технико-экономической эффективности применения высокопрочных материалов для тороидальных прочных корпусов при ограничении по прочности и общей устойчивости с целью создания

рациональных в весовом и технологическом отношении корпусов в зависимости от глубины эксплуатации на начальной стадии их проектирования.

Объект исследования – тороидальный прочный корпус подводного аппарата, находящийся под действием внешнего гидростатического давления.

Предмет исследования – устойчивость и прочность тороидального прочного корпуса, изготовленного методом намотки из армированных композиционных материалов.

Методы исследования. Для построения математической модели устойчивости тороидального прочного корпуса, полученного методом намотки из полимерных композиционных материалов, использованы известные положения линейной теории слоистых ортотропных оболочек вращения, методы математического моделирования упругих характеристик ортотропных композиционных материалов по известным свойствам компонентов. Для решения систем дифференциальных уравнений использован метод Бубнова-Галеркина.

Диссертационная работа основывается на трудах отечественных и зарубежных ученых в области теории корабля, теории проектирования судов. Большое научное и практическое значение в области проектирования и расчета корпусных конструкций в надводном и подводном судостроении имеют работы Суслова В. П., Кочанова Ю. П., Козлякова В. В., Бурдуна Е. Т., Григолюка Э. И., Кравцова В. И., Зайцева В. В., Коробанова Ю. Н., Панфилова Н. А., Вольмира А. С., Коростылева Л. И., Архангородского А. Г., Шостака В. П., Кржечковского П. Г., Магулы В. Э. и других.

Научная новизна работы заключается в создании концепции проектирования тороидального прочного корпуса из однонаправленных композиционных материалов для перспективных подводных аппаратов в комплексе совместного решения задач прочности и устойчивости при гидростатическом сжатии с учетом технологии их изготовления. В процессе реализации данной концепции получены следующие новые результаты:

1. Впервые усовершенствована математическая модель потери устойчивости под действием внешнего гидростатического давления тороидального прочного корпуса, которая построена на базе геометрически линейной теории слоистых ортотропных оболочек с учетом, в отличие от существующих моделей, конструктивно-технологических особенностей формования тороида методом намотки из композиционных материалов, а именно: переменность толщины корпуса и дискретная структура стенки из композиционного материала.

2. Впервые на основе усовершенствованной математической модели потери устойчивости получено аналитическое решение задачи устойчивости тороидального прочного корпуса при гидростатическом сжатии, которое позволяет прогнозировать величину верхнего критического давления, учитывая геометрию тороида, свойства компонентов ПКМ, схему армирования и переменность толщины, как результат формообразования корпуса методом намотки.

3. Дополнительно получены научные данные о влиянии схемы армирования, геометрических параметров корпуса, перспективных типов армирующих наполнителей и связующих, переменности толщины и ее осреднения в намотанном тороидальном корпусе на величину верхнего критического давления, используя анализ упругих характеристик слоистого композиционного материала. Установлено, что замена расчета тороидальной оболочки со структурой слоистого материала со слоями переменной толщины на оболочку с осредненной постоянной толщиной слоев вдоль поперечного сечения приводит к завышению величины верхнего критического давления до 40% в пределах исследованных диапазонов проектных параметров.

Практическая значимость полученных результатов определяется следующим:

– предложена новая конструктивная схема подводного судна типа «ныряющее блюдо» повышенной маневренности (Патент на полезную модель № 78215, заявл. 18.09.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5);

– разработанная методика расчета верхнего критического давления потери устойчивости при гидростатическом сжатии тороидального прочного корпуса, выполненного методом намотки из однонаправленных КМ, позволяет корректно формулировать задачи численного моделирования напряженно-деформированного состояния и устойчивости (Методика разработки схемы армирования прочного тороидального корпуса из полимерных композиционных материалов с позиции потери устойчивости и прочности, № УКФА.362111.001.М. – 2010. – НУК ім. адм. Макарова, Миколаїв, 2010. – 12 с.);

– разработанный расчетно-аналитический алгоритм для проектирования и выбора рациональных проектных параметров композитного тороидального корпуса, а также полученные результаты и рекомендации могут быть применены на этапе разработки технико-экономических обоснований перспективных подводных аппаратов с тороидальным прочным корпусом на начальных стадиях их проектирования.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в постановке задач, решенных в диссертации, в самостоятельном выполнении теоретических исследований, а также интерпретации полученных результатов.

В публикациях, написанных в соавторстве, соискателю принадлежат такие научные результаты: [2, 12, 13] – анализ распределения эффективных упругих постоянных в замкнутой круговой тороидальной оболочке, полученной методом намотки из ПКМ; [10] – вывод уравнений равновесия для расчета устойчивости ортотропных тороидальных оболочек переменной толщины; [3, 5, 11, 14] – получение расчетных данных о влиянии схемы армирования, геометрии тороида, типов армирующих наполнителей и связующих, переменной толщины и ее осреднения в намотанном тороидальном корпусе на величину верхнего критического давления потери устойчивости тороидальных оболочек при гидростатическом сжатии; [7, 18] – обобщение комплекса данных аналитических расчетов устойчивости тороидальных прочных корпусов из разных материалов по критерию минимума массы и

стоимости; [8, 17] – получение новых данных и их обобщение после отработки разработанной расчетно-аналитической методики рационального проектирования тороидальных прочных корпусов, которые изготавливаются методом намотки из ПКМ, на основе требований прочности и устойчивости при гидростатическом сжатии.

Апробация результатов диссертации. Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 12 конференциях: 26-й, 27-й, 30-й Международных конференциях-выставках «Композиционные материалы в промышленности. (СЛАВПОЛИКОМ)» (Ялта, 2006, 2007, 2010 гг.); на научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава НУК (Николаев, 2006); на I и V Международных научно-технических конференциях «Инновации в судостроении и океанотехнике» (Николаев, 2010, 2014 гг.); на II и III Международных научно-технических конференциях «Актуальні проблеми прикладної механіки та міцності конструкцій» (Николаев, 2010, 2011 гг.); на II Международной научно-технической конференции «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Николаев, 2012); на Всеукраинских научно-технических конференциях с международным участием «Підводна техніка і технологія» (Николаев, 2012, 2014); на Всеукраинской научно-технической конференции «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Николаев, 2014).

Публикации. Основные результаты исследований, вошедшие в диссертацию, опубликованы в работах: 7 статьях (из них 3 статьи являются единоличными) специализированных изданий, которые включены в перечень специализированных изданий, рекомендованных ДАК МОН Украины, одной статье в международном научном журнале Астраханского государственного технического университета (Россия), 2 отчетах НИР, 9 публикациях в материалах работ научно-технических и международных научных конференциях. Получен один патент на полезную модель в соавторстве.

РАЗДЕЛ 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОЧНЫХ КОРПУСОВ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ И КОНСТРУКЦИЙ

1.1 Анализ существующих и перспективных форм прочных корпусов подводных технических средств освоения океана

Океанотехника – интенсивно развивающаяся область, в которой сложились общие тенденции и технические традиции, наметились определенные направления и существуют нерешенные проблемы. [1] Существующая подводная техника является разнообразной: подводные лодки, подводные аппараты (автономные, самоходные и несамоходные, привязные, обитаемые и необитаемые), подводные лаборатории (стационарные и передвижные). [2 – 6] Все они отличаются большим разнообразием тактико-технических элементов, принципов действия, форм, технических решений. Это обусловлено, прежде всего, назначением и условиями работы аппаратов. Кроме того, подводное судостроение не обременено традициями, присущими другим областям техники, что дает большой простор дизайнерам и технологам при принятии новаторских решений по поводу отдельных элементов подводных конструкций и всей конструкции в целом. Подводная техника в настоящее время развивается с внедрением новых материалов и технологий при разработке новых и модернизированных проектов подводной техники, которые обеспечат создание многофункциональных аппаратов с достаточным боковым обзором и улучшенной маневренностью.

Основными компонентами типичных подводных аппаратов и подводных судов являются: прочный корпус, защищающий экипаж от действия внешнего давления, а в случае необитаемого подводного аппарата – защищающего аккумуляторные батареи и электронику; блоки плавучести; источник энергии и преобразователь мощности (двигательный комплекс) и оборудование,

предназначенное для наблюдения. [6] Эти четыре компонента взятые отдельно или вместе составляют значительную часть первоначальной стоимости судна и его общей массы и налагают ограничения на рабочие характеристики судна, поскольку подводная скорость зависит от гидродинамики подводного судна, его размеров и объема. Блоки плавучести и движительный комплекс с аккумуляторами также занимают значительную часть объема судна.

Одной из основных проблем широкомасштабного освоения мирового океана является создание прочных корпусов (ПК), обладающих необходимой надежностью при минимальном относительном весе. Проектирование прочного корпуса подводной техники – это поиск наиболее эффективного варианта конструктивного облика и наиболее рациональных значений конструктивных параметров. Корпус должен быть компактным и легким настолько, насколько это возможно, при этом иметь соответствующую прочность и устойчивость, чтобы противостоять внешнему гидростатическому давлению.

В настоящее время прочные корпуса подводных технических средств обычно имеют форму круговых цилиндров, сфер, эллипсоидов, конусов или куполов (оконечности) [6] (таблица 1.1). Наиболее эффективным прочным корпусом является сферическая оболочка, поскольку такой корпус ведет себя как идеальная мембрана. Обитаемые ПА, которые достигли дна Марианской впадины (11000 м), имеют сферический прочный корпус.[6, 7] Но, несмотря на этот факт, большинство подводных аппаратов и подводных лодок не спроектированы на основе сферической оболочки, поскольку такие аппараты по гидродинамическим характеристикам не подходят и внутреннее пространство сферы неэффективно для расположения экипажа и оборудования.

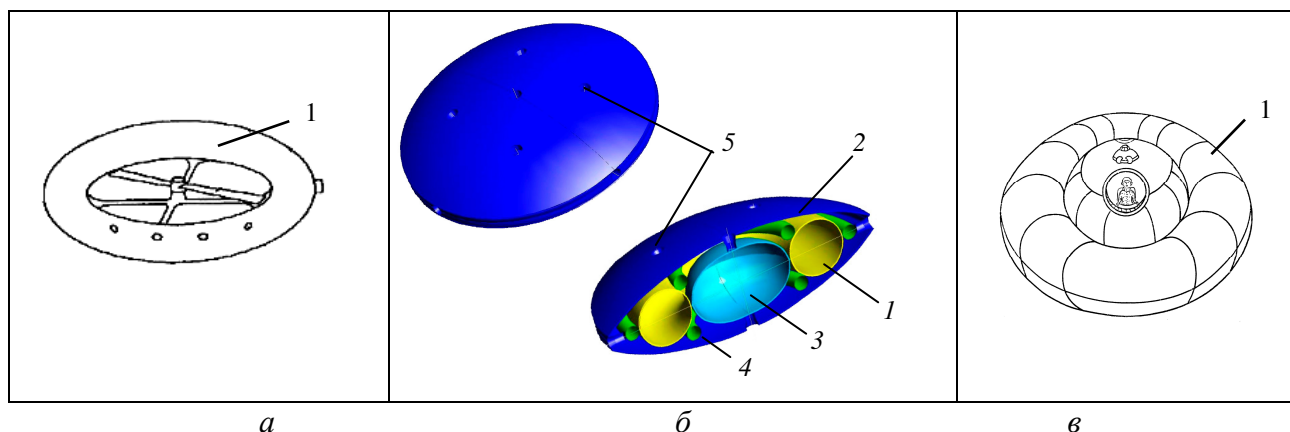
Для подводных технических средств, работающих на глубинах до 6000 м, применяются цилиндрические прочные корпуса. Прочный корпус подводных технических средств является одной из самых трудных конструкций при проектировании.

Таблица 1.1 – Преимущества и недостатки различных форм прочных корпусов

Форма	Преимущество	Недостаток
Сфера	1. Наилучшее отношение массы к водоизмещению. 2. Легкость создания отверстий в корпусе. 3. Анализ напряженного состояния более точный и наименее сложный.	1. Сложности при внутреннем размещении экипажа и оборудования. 2. Большое гидродинамическое сопротивление движению. 3. Сложности формообразования при увеличении габаритов
Эллипсоид	1. Подходящее отношение массы к водоизмещению. 2. Более эффективное внутреннее размещение.	1. Дороже и сложнее производство. 2. Усложнение расчета конструкции.
Цилиндр	1. Технологичность как при производстве из металлов, так и из ПКМ методом намотки. 2. Наиболее эффективное внутреннее размещение. 3. Малое гидродинамическое сопротивление движению. 4. Круговой цилиндр обладает хорошей гидродинамической формой, лучшей, чем сфера того же объема. 5. Дополнительный объем внутри прочного корпуса может быть достигнут за счет увеличения длины цилиндра (до 10 радиусов поперечного сечения).	1. Наименее эффективное отношение массы к водоизмещению. 2. Сложный расчет конструкции с отверстиями в цилиндрическом корпусе. 3. Сложность разворота и маневрирования у подводных аппаратов, лодок с цилиндрической формой корпуса.
Тороид	1. Хорошая гидродинамическая форма при комплексном объединении компоновочных и конструктивных решений в подводном техническом средстве. 2. Технологичность за счет возможности изготовления тороида методом намотки из ПКМ. 3. Тороиды малочувствительны к начальному несовершенству геометрии. Возможность изготовления тороида как с круговым поперечным сечением, так и эллиптическим, в котором наибольшая полуось расположена вдоль центральной оси тороидальной оболочки, что повышает устойчивость корпуса и способствует более эффективному внутреннему размещению. 4. По сравнению с цилиндром толщина стенки тороида может быть уменьшена в 1,5...2 раза.	1. Не решены задачи устойчивости, прочности под действием внешнего равномерного давления 2. Сложный расчет тороидального корпуса с отверстиями.

Сегодня при разработке новых проектов в подводном судостроении уделяют внимание поиску эффективных решений для подводных технических средств, форма которых обладает хорошими гидродинамическими характеристиками, и разработке способов приведения в движение подводного аппарата. Объединенные эти качества в одном аппарате способствовали бы увеличению скорости движения под водой и повышению маневренности.

Известны оригинальные проекты [8 - 28] подводных аппаратов (рис. 1.1), судов (рис. 1.2) и подводных буровых платформ, станций (рис. 1.3 и 1.4) с прочным корпусом в форме тороида. Их появление обусловлено рядом преимуществ тороидальной формы. Тороид обладает гидродинамической формой, устойчивой на поверхности воды и на глубине. За счет двойной кривизны тороида толщина стенки прочного корпуса на его основе по сравнению с цилиндрической формой может быть уменьшена в 1,5 – 2 раза, что тем самым позволит увеличить глубину погружения. [22]



а – крупногабаритное подводное судно (Baba Elichi, Япония) [10];

б – подводное судно типа «ныряющее блюдце» повышенной маневренности (Бурдун Е.Т., Крептюк А.В., Украина) [11];

в – корпус глубоководного аппарата (Пятницкий Ю.А., Ганов Э.В., Россия) [9];

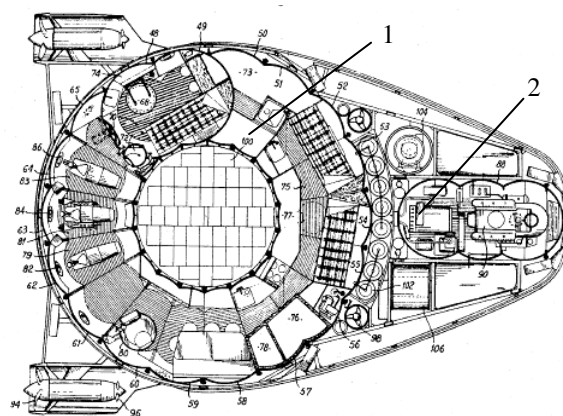
1 – основной тороидальный прочный корпус; 2 – корпус-обтекатель; 3 – прочный корпус в форме эллипсоида; 4 – тороидальная емкость; 5 – поворотные сопла

Рисунок 1.1 – Конструкции подводных технических средств с прочным корпусом в форме тора (поз. 1)

Комплексное объединение компоновочных и конструктивных решений в подводном техническом средстве с тороидальным ПК обеспечит улучшенную маневренность, точность выдерживания направления движения и управления динамическим позиционированием.

В [10] предложена конструкция крупногабаритного подводного технического средства (рис. 1.1, а), прочный корпус которого имеет форму тора. В свободном центральном пространстве тороидального прочного корпуса установлен вертикальный винт с лопастями, который приводится во вращательное движение двигателем.

В [11] описывается проект автономного подводного судна, состоящего из одной или нескольких горизонтальных тороидальных



1 – корпус в форме тороида;

2 – сферический корпус

Рисунок 1.2 – Подводный корабль [26]

оболочек в качестве прочных корпусов, помещенных в обтекаемый легкий корпус (рис.1.1, б). Такая конструкция будет иметь эффект “крыла”, что уменьшит сопротивление движению в водной среде и увеличит маневренность необитаемого подводного аппарата. Оборудование такого подводного аппарата, например, комплексом специально ориентированных водометных движителей позволит осуществлять продольное движение, пространственное маневрирование и стабилизацию аппарата в водной среде при выполнении им рабочих операций. Сечение тороидальной оболочки может быть круглым или эллиптическим, в котором наибольшая полуось расположена вдоль центральной оси тороидальной оболочки.

Поскольку крупные обитаемые подводные комплексы, то есть подводные лаборатории, являются одним из наиболее эффективных технических средств исследования и освоения морских глубин, то сегодня разрабатываются и новые проекты подводных лабораторий, прочным корпусом которых будет одна или несколько крупногабаритных тороидальных оболочек. Например, Westinghouse Electric Corp. предложен проект обитаемой подводной станции, прочный корпус которой имеет форму тора с внешним диаметром 12,2 м с круглым сечением радиусом 1,525 м. Станция либо лежит на полусферическом бетонном основании на морском дне либо пришвартовывается к этому основанию и

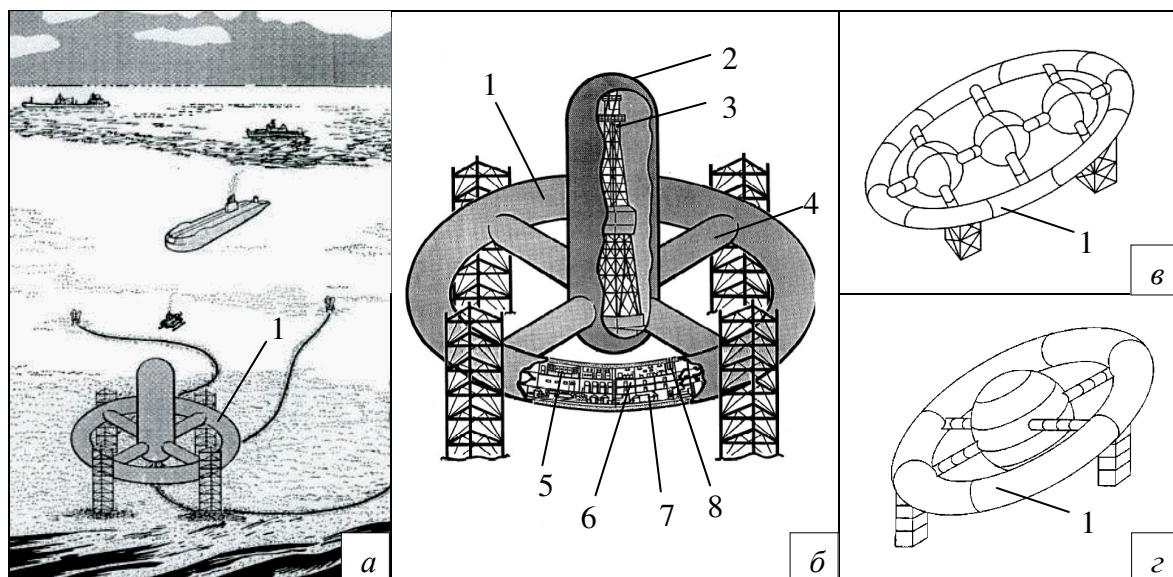
поднимается на необходимую глубину. Дополнительные тороидальные модули могут быть присоединены вертикально для расширения возможностей станции. Станция с предполагаемой рабочей глубиной до 1800 м может использоваться для коммерческого исследования океана, для разработки месторождений [12, 13].

В [28] описывается проект подводного жилища Atlantis II (рабочая глубина погружения – 3000 м), который имеет форму тора с парой сфер, прикрепленных на противоположных сторонах (рис. 1.3). Согласно проекту Atlantis II закрепляется в 20 метрах от дна океана.



1 – тороидальный корпус;
2 – сферический корпус
Рисунок 1.3 – Проект подводного жилища Atlantis II [28]

На сегодня существует необходимость в подводной буровой платформе или способной погружаться в воду буровой установки, приспособленной к глубоководному бурению. Поскольку в настоящее время предел глубины глубоководного метода бурения составляет приблизительно 3000 м по нескольким причинам: максимальный вес райзера, который может выдержать плавучая буровая платформа; способность поддерживать плавучую буровую платформу в пределах очень ограниченного радиуса выше местоположения подводной скважины, особенно при наличии сильного течения и высоких волн. [29, 30] 72% площади мирового океана имеет глубины от 3000 до 6000 м. Поэтому подводные буровые платформы избавят от трудностей, связанных с удержанием их в заданной точке, и от необходимости длинных райзеров. Появлению проектов подводных буровых платформ и станций с тороидальным прочным корпусом (рис. 1.4) предшествовало открытие ниже дна океана большого количества залежей гидратов метана, которого приблизительно в 2 раза больше, чем все топливо на земле и мелководье [14, 31].



1 – прочный корпус в форме тороидальной оболочки; 2 – центральный цилиндрический прочный корпус; 3 – буровая вышка; 4 – соединяющие туннели; 5 – машинная палуба; 6 – каюты; 7 – бытовые отсеки; 8 – место стыковки

Рисунок 1.4 – Проекты подводных буровых платформ (Ross & Lafolley-Lane, США) для добычи нефти и гидратов метана на глубине 3000-5000 м (а, б) [14,18] и подводных станций (в, г) [14, 20]

В большинстве проектах подводных буровых платформ, разрабатываемых для добычи гидратов метана, прочный корпус предложен в форме тора (рис. 1.4, а, б) [14, 15]. Конструкции этих подводных платформ описаны в деталях Россом и Лафолу-Лейном [21]. Согласно проекту тороидальный прочный корпус из СП (рис. 1.4, а, б) должен быть диаметром 80 м с внутренним радиусом сечения в 10 м и толщиной стенки 345 мм; соединяющие туннели - внутреннего диаметра 7 м и толщиной 245 мм; центральный прочный корпус – высотой 60 м, внутренним диаметром сечения 20 м, толщиной 695 м. Такие подводные конструкции смогут длительно находиться под водой стационарно с возможностью медленно перемещаться. Необходимым условием при этом является хорошая гидродинамическая форма тора.

1.2 Технические требования к проектированию прочных корпусов

Успех и безопасность подводных спусков в основном зависят от надежности ПК, защищающего экипаж и оборудование подводной техники от воздействия разрушительного давления воды. Существуют 4 основных шага при проектировании прочных корпусов [6, 32]: выбор формы корпуса, выбор материала, толщины корпуса, определяемой из рабочей глубины погружения и коэффициента безопасности, а также спроектировать иллюминатор, торцевые крышки и гермовводы.

Расширенная методологическая схема проектирования прочного корпуса подводных технических средств освоения океана [32] представлена на рис. 1.5.

Форма и толщина стенок корпуса при проектировании подводного аппарата задаются с учетом рабочей глубины погружения и типа материала, из которого изготавливается корпус. Поэтому задачу проектирования оптимального прочного корпуса как тонкостенного сосуда, находящегося под действием внешнего давления, может быть сформулирована так: при заданных гидростатическом давлении и объеме прочного корпуса определить форму корпуса и характеристики материала таким образом, чтобы масса всей конструкции была минимальной.

Основным критерием качества прочного корпуса считается отношение массы прочного корпуса к его водоизмещению $m_{ПК}/m_w$, поскольку у большинства аппаратов оно обеспечивает плавучесть, то есть если $m_{ПК}/m_w > 1$, аппарат утонет. При сравнении нескольких прочных корпусов с равными глубинами погружения и равными объемами лучшим следует считать прочный корпус, имеющий меньшее $m_{ПК}/m_w$. [15]

Опыт проектирования подводных технических средств показывает, что от величины $m_{ПК}/m_w$ прочного корпуса зависят его основные эксплуатационно-технические характеристики, к которым относятся, прежде всего, масса полезного груза, размещаемого в прочном корпусе и дальность хода, определяющая рабочую автономность аппарата при принятой скорости. Рост

глубины погружения подводного судна приводит к увеличению $m_{ПК}/m_w$ корпуса и к уменьшению дальности плавания при заданной скорости хода несмотря на применение высокопрочных материалов и усовершенствованных конструкций. В результате при проектировании возникает необходимость использовать все проектно-конструкторские резервы для обеспечения при возросших глубинах погружения необходимой дальности, автономности плавания и размещения требуемого полезного груза.

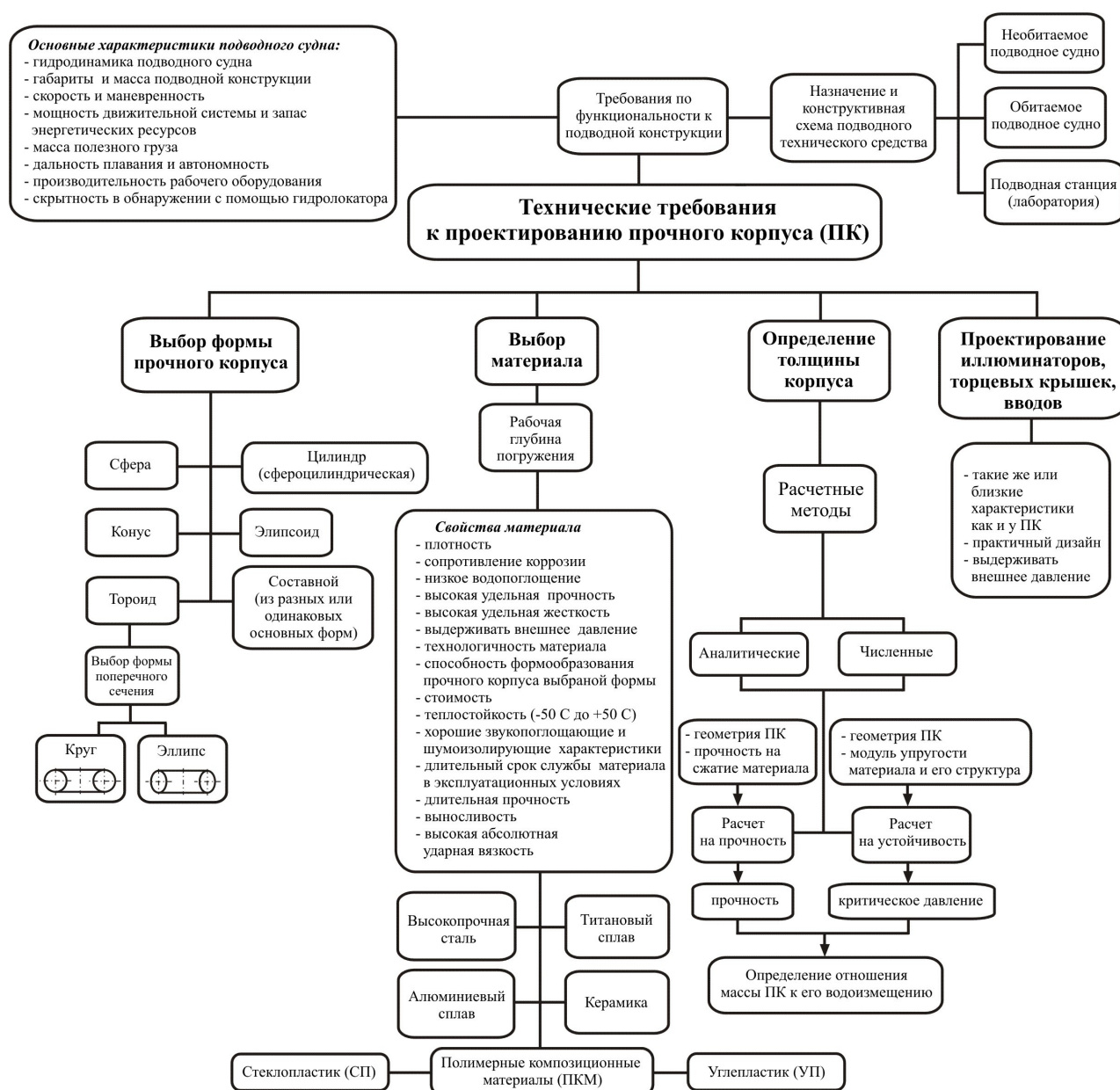


Рисунок 1.5 – Технические требования к проектированию прочного корпуса подводных технических средств освоения океана

При использовании существующих традиционных конструкционных материалов (высокопрочная сталь, титановые и алюминиевые сплавы) для придания глубоководной технике необходимой плавучести приходится применять дополнительные объемы плавучести в виде отдельных поплавков, состоящих из легких твердых материалов - синтактной пены с плотностью $0,5...0,64 \text{ г/см}^3$ [33, 34] или керамические макросферы (автономный необитаемый подводный аппарат Nereus [35]). Поплавки существенно увеличивают внешний объем и вес подводных аппаратов. [3] От этого возрастают требования по мощности двигателей и электросиловых установок. С ростом веса аппарата увеличивается его «тормозной» путь и ухудшаются динамические характеристики в процессе движения. [3] Отказ от использования поплавков в глубоководной технике сможет обеспечить значительное уменьшение мощности ходовых двигателей со всеми вытекающими из этого последствиями. [3]

Условия эксплуатации подводных аппаратов, судов, лабораторий предъявляют к материалам их прочных корпусов особые требования. [6] Для изготовления прочных корпусов современных подводных аппаратов применяют сталь, алюминиевые и титановые сплавы, стекло, керамику, композиционные материалы. У каждого материала есть свои преимущества и недостатки, поэтому его выбор зависит от конструкции аппарата, глубины погружения, назначения и других факторов. [6]

Основным напряженным состоянием прочного корпуса в эксплуатационных условиях является сжатие, и разрушение большинства тонкостенных конструкций обусловлено потерей их общей устойчивости. [6] Поэтому прочность на сжатие, модуль упругости материала, плотность и плавучесть являются ключевыми факторами при выборе материала для прочного корпуса (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Сравнение свойств материалов для изготовления прочных корпусов подводных аппаратов и конструкций [2, 33, 36, 37]

Материал	Плотность, кг/ м ³	Предел текучести/ прочности при сжатии, МПа	Модуль упругости, ГПа	Удельная прочность	Удельная жесткость
Алюминиевый сплав (В95) [2]	2800	500-600	70	180	25
Титановый сплав (ВТ6, ВТ22) [2]	4420	800-1100	125	185	24
Сталь (АК25, АК44) [2]	7800	1300-2200	200	270-280	27
Углепластик (УВ/ ЭС [0°,90°]) [36, 37]	1400...1600	1000	100	590	59
Стеклопластик (СВ/ ЭС [0°,90°]) [33]	2000	1000	50	475	24

Сегодня материал для прочных корпусов должен не только быть способным выдерживать высокое давление, но также иметь другие соответствующие свойства, которые смогут противостоять действию внешней среды. Некоторые из этих свойств следующие: хорошее сопротивление коррозии; высокая удельная прочность; хорошие звукопоглощающие характеристики; немагнитность; технологичность (возможность изготовления конструкции «легко»); способность формообразования прочного корпуса; термоустойчивость; длительный срок службы материала.

В [38] отмечено, что характеристики идеального материала для подводных замкнутых корпусных конструкций, работающих под действием внешнего гидростатического давления, должны быть такими: плотность – 1800 кг/м³, модуль упругости – 370 ГПа, предел текучести (прочности) – 2000 МПа.

Следует отметить, исходя из данных таблицы 1.2, что удельные жесткости (отношения модуля упругости к плотности материала) стали, алюминиевых и титановых сплавов практически одинаковы. Удельная же прочность сталей составляет 0,5...2,0 удельной прочности алюминиевых и 0,15...0,7 титановых сплавов. [39] Титановые сплавы обладают рядом недостатков: плохая обрабатываемость резанием и свариваемость, вследствие

высокая стоимость технологий их производства и обработки; высокая склонность к водородной хрупкости и солевой коррозии; там, где размеры сечений конструктивных элементов определяются их устойчивостью, существенного выигрыша в массе конструкций при применении титановых сплавов не будет. [39, 40]

Масса, например, цилиндрического прочного корпуса, выполненного из керамики Al_2O_3 , может быть на 85% меньше, чем аналогичный корпус из титана, однако технологии производства корпусов из керамики все еще развиваются и основным препятствием на пути использования керамики, кроме как материала для элементов плавучести, стоит ее хрупкость и высокая чувствительность к концентрации напряжений, что усложняет, а то и вовсе исключает устройство гермопроходов в керамический прочный корпус.

Последние 30 лет идет интенсивная разработка новых проектов подводных аппаратов с прочными корпусами на основе стеклопластиков, углепластиков и керамики, обладающих самими высокими значениями удельной прочности и жесткости, как основных характеристик для эффективного использования в подводном судостроении. [23, 41 – 46] Поскольку традиционно применяемые металлы, такие как высокопрочная сталь, титановые и алюминиевые сплавы, не имеют резерва для снижения массы корпусов, то применение полимерных композиционных материалов, таких как углепластик и стеклопластик, обеспечивает уменьшение массы подводных аппаратов и упрощение конструкций прочных корпусов за счет изготовления интегральных конструкций и исключения ребер жесткости в корпусе.

Мировое потребление полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных и стеклянных волокон в судостроении, нефтегазодобывающей и других отраслях с каждым годом растет. Согласно прогнозу [47], спрос на углеродное волокно в нефтегазодобывающей отрасли с 2015 г. на конец 2020 г. увеличится в 4 раза, в малотоннажном судостроении (яхты, моторные лодки, водные мотоциклы и др.) – в 1,5 раза. Прогнозируется

также увеличение использования волокнистых ПКМ в конструкциях подводных аппаратов, судов и сооружений, в частности и как конструкционных материалов для прочных корпусов.

Рост интереса к ПКМ как конструкционным материалам, способным заменить традиционные металлические детали и конструкции в подводных технических средствах освоения океана, обусловлен накоплением достаточных знаний о свойствах КМ и широкого ассортимента высокомодульных и высокопрочных волокон (углеродных и стеклянных), совершенствования расчетных методов проектирования изделий из них, особенно в авиакосмической технике, развития хорошо отлаженных технологий получения изделий из композиционных материалов.

В 1991 г. Смит [14] показал, что неоребранный круговой цилиндр, сделанный из СП, может погружаться в 8 раз глубже, чем аналогичный, спроектированный из стали, а из УП – в 10 раз глубже.

ПКМ обладают высокой коррозионной стойкостью, удельной прочностью, имеют больший срок службы, чем металлы (например, в течении 25 лет углеволокна теряют только 2...10 % своей начальной прочности). [48]

Способность выдерживать композитами циклические нагрузки гораздо выше, чем у металлов, в отличие от низкой прочности при статической нагрузке композитов, когда есть дефекты и повреждения. Циклическая прочность УП в 2-3 раза выше, чем у СП, и на порядок выше по сравнению с алюминиевыми сплавами. Среди недостатков углепластиков - меньшая, по сравнению со СП ударная вязкость и более высокая чувствительность к концентрации напряжения.[49, 50]

ПКМ снижают вибрацию на порядок лучше, чем металлы, имеют высокие коэффициенты звукопоглощения [51], поэтому подводные судна с прочным корпусом из ПКМ трудно будет обнаружить гидролокатором.

Свойства углепластиков и стеклопластиков зависят от свойств армирующих материалов и полимерной матрицы, текстуры армирующего

материала или схемы армирования, коэффициента объемного содержания наполнителя, метода формования ПКМ и т.д.

В подводном судостроении, как правило, используются ПКМ на основе эпоксидных и полиэфирных смол. В последние годы проводятся исследования по созданию и внедрению полимерных связующих, в том числе и термопластичных, обеспечивающих высокие прочностные свойства, низкие водопоглощение и температуру экзотермической реакции (для реактопластов). В [52] сообщается о промышленном изготовлении методом вакуумной инъекции крупногабаритных укрытий из стеклопластика для защиты подводных нефте- и газопроводов. В качестве связующего была применена полиэфирная смола с низкой вязкостью и контролируемыми характеристиками экзотермической реакции, что позволяет быстро изготавливать слоистые композиционные материалы толщиной до 60 мм (местные утолщения в корпусе до 80 мм).

1.3 Метод намотки в производстве прочных корпусов из полимерных композиционных материалов

В подводном судостроении прекрасно зарекомендовал в качестве эффективного способа формообразования оболочечных конструкций из углепластика и стеклопластика метод автоматизированной намотки, который сегодня позволяет изготавливать не только объемные изделия практически любых размеров, но и реализовывать максимальные показатели физико-механических свойств полимерных композитов.

1.3.1 Характеристика метода намотки как основного способа создания композитных прочных корпусов из однонаправленных композиционных материалов

Под методом намотки понимается процесс формообразования оболочечных конструкций путем намотки (укладки) с натяжением

непрерывного армирующего наполнителя (нитей, волокон, жгутов, ровингов, лент или полотнищ) на оправку по траекториям, которые определены схемой армирования композитной оболочки. После реализации методом намотки необходимой структуры материала и толщины стенки композитной оболочки происходит отверждение изделия и последующее удаление технологической оправки. [53] В настоящее время метод намотки хорошо отработан для изготовления большого класса выпуклых оболочечных конструкций на намоточных 5-координатных станках с ЧПУ. [51, 53, 54, 55]

Создание ПКМ одновременно с формованием оболочечной конструкции является причиной для комплексного решения многих вопросов конструирования и формообразования изделия, которые совмещены уже на стадии инженерного проектирования. [53] Таким образом, конструкторско-технологические задачи проектирования и производства конструкций из ПКМ не могут рассматриваться отдельно, в отличие от производства изделий из металлов.

Конструктивная анизотропия механических свойств однонаправленных КМ создала предпосылки для создания методик проектирования оптимальных и рациональных конструкций. Однако для разработки оптимальных конструкций необходимо теоретически обосновать и аналитически определить формы поверхности и схемы укладки армирующего наполнителя в материале стенки изделия, т. е. рассчитать параметры формирующей структуры ПКМ и одновременно установить траектории намотки волокнистых армирующих материалов в процессе формообразования самого изделия на технологической стадии производства.

Основное влияние на развитие метода намотки как технологического процесса изготовления композитных конструкций оказали три типа стеклопластиковых оболочечных изделий: цилиндрические трубы, корпуса твердотопливных двигателей и баллоны высокого давления.

В основном, глубоководные конструкции являются анизотропными сосудами давления. [55] Намотанные конструкции обеспечивают почти

стоцентную эффективность в отношении прочности к весу. [55] При использовании изотропных металлов для обеспечения нагрузочных характеристик только в каком-либо одном направлении необходимо увеличивать толщину всей конструкции, следовательно, и ее массу. Металлические конструкции только частично используют прочность в других направлениях.

Выбор метода намотки для формирования прочных корпусов подводной техники и сооружений обусловлен его достоинствами по качеству создаваемых оболочечных конструкций и их производству:

– применение высокопрочных волокон низкой плотности ($\rho = 1800 \dots 2500 \text{ кг/м}^3$) в сочетании с низкой плотностью полимерных связующих ($\rho = 1000 \dots 1200 \text{ кг/м}^3$) позволяет создавать корпусные конструкции минимальной массы; а высокое объемное содержание высокопрочных волокон ($\eta = 0,62 \dots 0,72$) в ПКМ способствуют получению высокой удельной прочности и жесткости в корпусных конструкциях;

– формование интегральных поверхностей изделий, что уменьшает количество соединяемых деталей в конструкции; сборка на оправке закладных, как правило, металлических элементов, их установки и фиксации в композитной стенке изделия [53];

– достижение высокого коэффициента использования материала (до 80...90 %).

К основным недостаткам метода намотки относятся необходимость наличия сложных и индивидуальных оправок многоразового или одноразового использования, большая длительность процесса отверждения полимерных композиционных материалов в случае использования эпоксидных связующих. [53]

Современная технология намотки позволяет изготавливать объемные изделия до 10 м в диаметре и длиной 38 м. [56] Производство тороидальных и цилиндрических прочных корпусов и различного назначения емкостей методом намотки позволяет получить идеально круглое поперечное сечение и

оказывается технологически более простой процедурой, чем создание их из металла путем сварки из предварительно согнутых или штампованных листовых заготовок, а также приведет к снижению массы подводного судна.

Поэтому возникают вопросы эффективности и возможности реализации тороидальных прочных корпусов благодаря отработанной технологии намотки тороидальных сосудов давления в промышленном масштабе и широкому ассортименту высокопрочных армирующих материалов и связующих. Согласно [53] намотанные торовые баллоны по сравнению с одинаковыми по объему композитными цилиндрическими баллонами имеют меньшую массу. Авторами [51, 53, 54, 57 – 62] проведен анализ теоретических, конструктивно-технологических решений и экспериментальных исследований по композитным конструкциям тороидальных сосудов высокого давления, показаны принципы их проектирования и изготовления методом намотки. Оптимальные проекты тороидальных баллонов давления, образованных намоткой, оказались технологичными и были реализованы на практике.

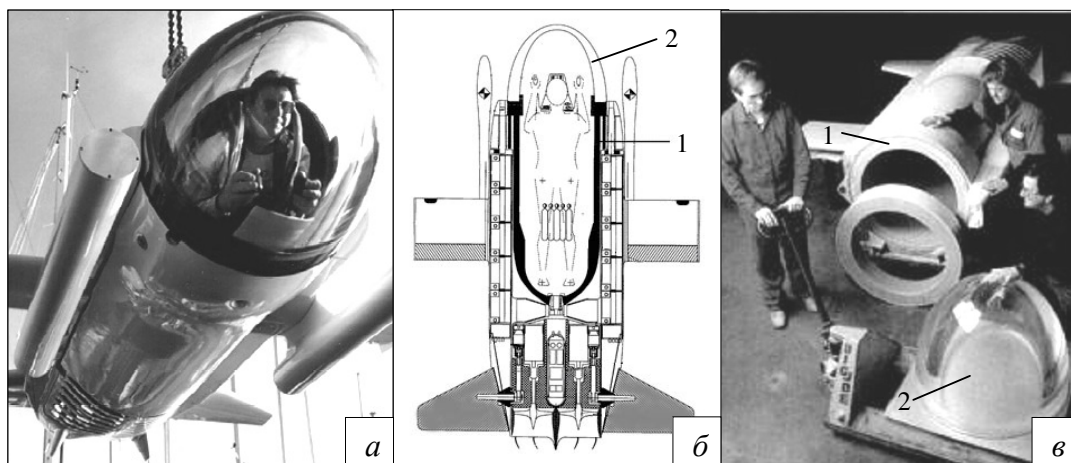
В работе [14] авторами выполнено сравнение материалов для подводной буровой платформы в форме тороида, которая будет находиться на глубине 11000 м. Показано, что при использовании металла прочный корпус становится настолько тяжелым, что не будет иметь достаточной плавучести, и в результате без дополнительной плавучести, конструкция утонет. Поэтому для погружения на большие глубины необходимо обеспечить максимальную удельную прочность. Проведенный Ross и Laffoley-Lane (США) [19] анализ прочности и плавучести на основе теории Ляме для толстостенных цилиндрических оболочек показал, что подводная буровая платформа должна быть спроектирована с применением композиционных материалов, удельная прочность и жесткость которых в несколько раз выше, чем высокопрочная сталь.

1.3.2 Опыт проектирования, постройки и испытаний подводных аппаратов с прочными корпусами, полученными методом намотки из композиционных материалов

За последние 30 лет было построено более 10 подводных аппаратов и подводных планеров с намотанными прочными корпусами из УП и СП, успешная работа которых подтвердила, что могут быть достигнуты глубины до 6000 м. [23]

Серия подводных обитаемых аппаратов Deep Flight (США) [63] проектировалась, используя опыт создания современных самолетов, применялись легкие высокопрочные КМ, а некоторые элементы подводных аппаратов (ПА) копируют элементы самолетов. ПК Deep Flight I (рис.1.6) представляет собой толстую цилиндрическую оболочку из СП и синтактной пены с полусферическим прозрачным акриловым иллюминатором.

СП вместе с синтактной пеной в автономном ПА Deep Flight I заменили металл во всех элементах конструкции. Комплект крыльев с «перевернутым» профилем позволяет лодке «летать» под водой и погружаться без балласта. [64]



а – фото Deep Flight I [67];

б – схема расположения основных элементов в Deep Flight I [63];

в – прочный корпус из СП и акриловый Deep Flight I на стадии изготовления [64];

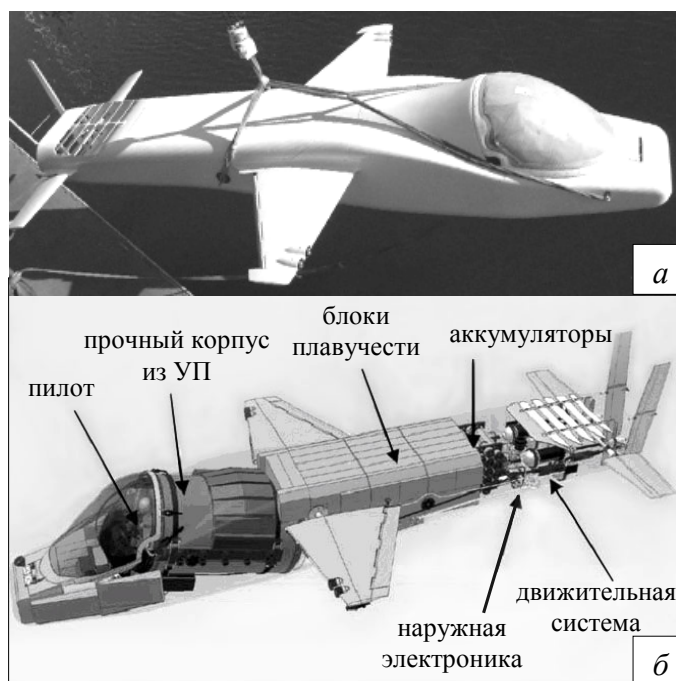
1 – прочный корпус из СП; 2 – акриловый иллюминатор

Рисунок 1.6 – Автономный обитаемый подводный аппарат Deep Flight I

Следующей разработкой этой серии был Deep Flight Challenger (переименован в 2012 г. в Virgin Oceanic) (рис. 1.7). Цилиндрический ПК подводного аппарата DeepFlight Challenger толщиной 130 мм был выполнен намоткой 50-миллиметровой лентой из углеродного волокна фирмы Grafil Inc [65]. Связующее – эпоксидная смола; коэффициент объемного содержания армирующего наполнителя в ПКМ – 0,67. [66] В 2007 этот ПА прошел проверку давлением в 110 МПа, что соответствует предельной глубине океана 10994 м, в испытательной камере лаборатории США – Applied Research Laboratory Building, где ВМФ США испытывает торпеды. Deep Flight Challenger прошел проверку, но образовалась маленькая трещина в кварцевом иллюминаторе. Испытания в открытом море не проводились.

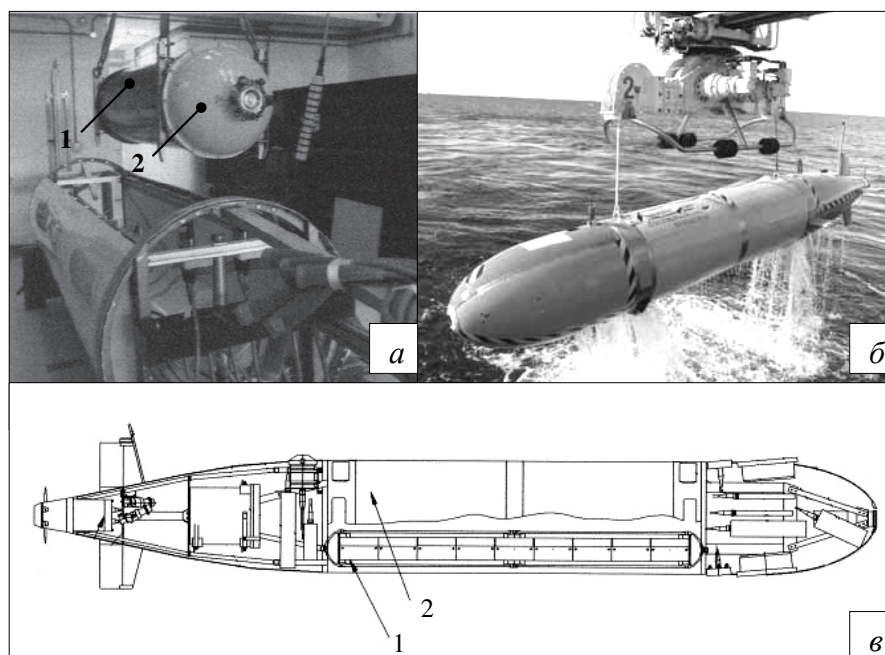
В 1988 году Лабораторией подводных технологий британского Национального Океанографического Центра в Саутгемптоне при финансировании Национальным Научно-исследовательским советом Великобритании была начата работа над проектом Autosub – робота, относящегося к семейству полностью автономных необитаемых подводных аппаратов. [45] Сборка первого опытного образца была начата в октябре 1995 года и уже в июле 1996 года Autosub-1 (рис. 1.8, а) осуществил свою первую автономную миссию. За прошедшие с момента первого погружения 15 лет Autosub прошел уникальный путь технической эволюции. [40]

Все проекты Autosub имеют торпедообразный корпус. Самый первый проект Autosub-1 (см. рис.1.8, а) имел главный прочный цилиндрический корпус из



а – фото Deep Flight Challenger [63];
 б – схема расположения основных элементов Deep Flight Challenger [66]
 Рисунок 1.7 – Автономный обитаемый подводный аппарат Deep Flight Challenger

стеклопластика, полученный методом намотки, с оконечностями из титанового сплава. [36] Корпус из СП был неоребранным и ограничивал глубину погружения Autosub-1 до 500 м, хотя титановые оконечности позволяют погружаться до 6000 м. Прочный корпус защищал аккумуляторные батареи и электронику от воздействия внешнего гидростатического давления.



а – подводное судно Autosub-1 на стадии изготовления [40]:

- 1 – главный прочный цилиндрический корпус из СП, изготовленный методом намотки;
- 2 – оконечности из титанового сплава;

б – фото Autosub-3 [68]; *в* – схема расположения основных элементов Autosub-3 [40]:

- 1 – 1 из 7 прочных корпусов из УП;
- 2 – синтактная пена вокруг прочных корпусов для дополнительной плавучести

Рисунок 1.8 – Автономные необитаемые подводные аппараты серии Autosub с прочными корпусами из КМ для защиты аккумуляторов и электроники

В 2000 году автономный подводный аппарат Autosub-1 был усовершенствован заменой одного стеклопластикового прочного корпуса в центральной части на 7 углепластиковых оребранных прочных корпусов с рабочей глубиной погружения в 1600 м (расчетная глубина погружения – 3000 м) вместе с дополнительными элементами плавучести из синтактной пены. Аппарат получил название Autosub-3 (рис.1.8, *б*, *в*). В 4 из 7 цилиндров находятся аккумуляторы и электроника, а 3 остальные обеспечивают плавучесть и защиту от внешнего давления различного рода приборов,

аппаратуры. Было выбрано 7 цилиндров вместо одного большого диаметра, поскольку существуют трудности в производстве углепластиковых толстостенных цилиндров, а также из-за сомнений авторов проекта в соответствии расчетной прочности с реальной у готового корпуса.

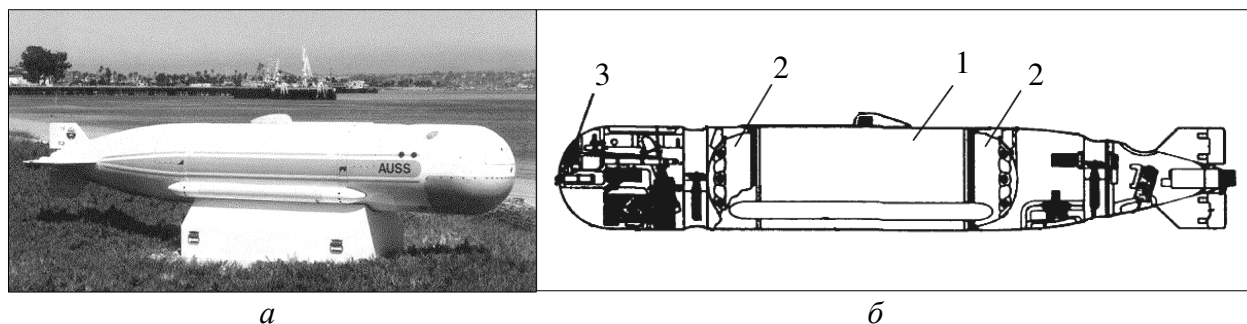
На основе платформы Autosub-3 был создан автономный аппарат Geosub, оптимизированный для повседневных работ в нефте- и газодобывающей промышленности. Как и Autosub-3, Geosub использует семь прочных корпусов из УП для аккумуляторов, в каждом корпусе размещено по одному аккумулятору. [40]

С увеличением глубины погружения при проектировании необходимо увеличивать толщину стенки прочного корпуса, при этом снижается плавучесть подводного судна, в результате количество аккумуляторов, которыми может быть оснащено подводное судно, становится небольшим, и как следствие, продолжительность пребывания под водой уменьшается.

В 1988 г. началась работа над созданием автономного необитаемого ПА AUSS (Advanced Unmanned Search System) (США), прочный корпус (рис. 1.9) которого имеет форму цилиндрической оболочки, изготовленной «мокрой» продольно-поперечной намоткой углепластиковой ленты. Была проведена серия теоретических исследований и экспериментов для выбора схемы намотки и материала – СП или УП [37, 69 – 72]. Проектируемая глубина погружения – 6200 м. Исследования проводились на уменьшенных в масштабе моделях цилиндрических оболочек из УП и СП. Коэффициент заполнения объема многослойного композиционного материала (ламината) из УП был 65...67%. Была разработана технология производства цилиндрической оболочки методом мокрой намотки. [37]

Прочный цилиндрический корпус из УП занимает центральную часть AUSS, дополнительная плавучесть обеспечивается синтактной пеной, которая в настоящее время применяется для компенсации отрицательной плавучести практически во всех современных подводных аппаратах. Оконечности

цилиндрического углепластикового ПК были полусферическими титановыми. Носовой и кормовой обтекатели были сделаны тоже из КМ (см. рис. 1.9).



а – фото AUSS [69], *б* – схема расположения основных элементов ПА AUSS [71]:

1 – прочный корпус из УП; 2 – титановые полусферы;

3 – дополнительная плавучесть (синтактная пена)

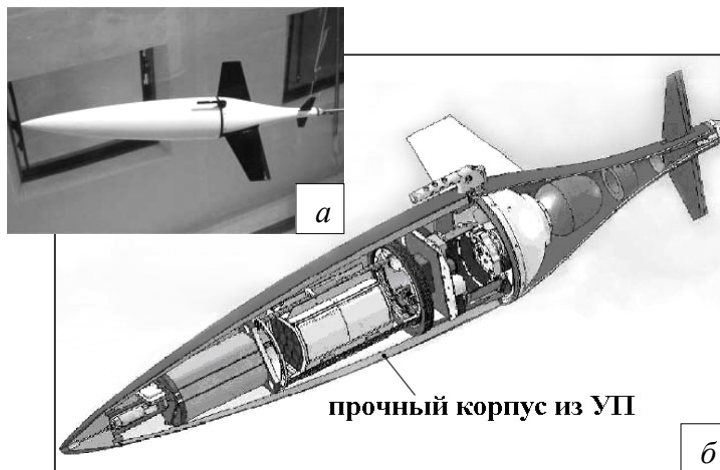
Рисунок 1.9 – Автономный необитаемый подводный аппарат AUSS

Специалистами Вашингтонского университета под руководством профессора океанографии Чарльза Эриксона (Charles C. Eriksen) разработан целый ряд автономных подводных планеров, классифицирующихся по давлению, которое они способны выдержать. [73] Подводные планеры – автономные подводные аппараты, приводимые в движение за счет изменения плавучести. С начала 2000-х годов применяются в научных и коммерческих исследованиях океана, военном деле и др.

Подводный планер Slocum Стоммела может опускаться на глубину до 200 метров, Spray – до 1500 м, Seaglider – до 1000 м, SeaExplorer – до 700 м, и Slocum Thermal – до 1200 м. Масса каждого планера – 52 кг. Все перечисленные подводные планеры имеют прочные корпуса из алюминиевого сплава, которые и придают им обтекаемую торпедообразную форму, кроме Seaglider, имеющий 2 корпуса: прочный – из алюминиевого сплава и легкий обтекаемый – из СП, к которому прикреплены крылья. [73 - 75]

В дальнейшем модель Seaglider была усовершенствована, и на ее платформе такого же размера (62 кг, диаметром 30 см, 1.8 м длиной) и формы, но с прочным корпусом из УП был спроектирован подводный планер Deepglider (рис. 1.10) с расчетной глубиной погружения в 6000 м. В 2010 г. Deepglider достиг проектируемой глубины в 6000 м, чем продемонстрировал,

что КМ могут обеспечить удельную прочность, превышающую удельную прочность металлов, и позволяют легко оптимизировать гидродинамическую форму корпуса за счет технологичности КМ. [76] В результате автономность подводного планера и УП корпус позволяют Deepglider оставаться в воде на протяжении целого года и достигать глубины 6000 м.



a – фото Deepglider;
б – схема расположения основных компонентов Deepglider

Рисунок 1.10 – Подводный планер Deepglider [76]

На основе платформы Slocum фирмой Teledyne Webb Reserch был выполнен подводный планер Waldo. Его торпедообразный корпус с крыльями длиной 1.5 м и диаметром 0,22 м выполнен из УП. [68]

В 1978 году в Великобритании было построено подводное спасательное транспортное средство LR5 грузоподъемностью 1200 кг или 16 человек с прочным корпусом из СП на полиэфирном связующем (рис. 1.11, *a*). При осмотре его в 2001 году не было выявлено никаких дефектов или износа [77].

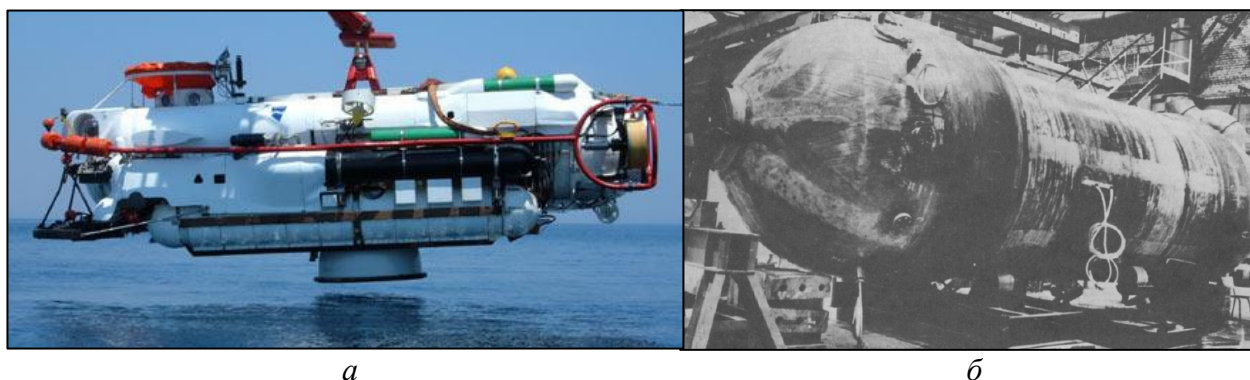


Рисунок 1.11 – Подводное спасательное транспортное средство LR5 (Великобритания) с ПК из СП (*a*) [77] и полномасштабный прочный корпус из СП (до испытания в автоклаве) диаметром 2,4 м и массой 17 тонн для подводной лодки (Россия) (*б*) [44]

В России также ведутся разработки глубоководных технических средств с прочным корпусом из КМ. В 1993 г. ЦНИИ КМ Прометей (Санкт-Петербург, Россия) были разработаны проекты глубоководных аппаратов из ПКМ с глубиной погружения до 2000 м (для обитаемых) и до 6000 м (для необитаемых) с намотанным прочным корпусом длиной 22 м, диаметром 8 м и общей массой 250 т. [44] Полномасштабный корпус диаметром 2,4 м и массой 17 тонн для подводного судна был полностью сделан методом намотки из СП (доля металла в конструкции меньше чем 0,1%), и при испытании в автоклаве выдержал давление в 35 МПа. (рис. 1.11, б)

КМ на основе металлической матрицы и керамики имеют много преимуществ перед основными материалами, но в настоящий момент они и технологии их формообразования в оболочки все еще находятся на стадии развития и их стоимость очень высока. Керамика была использована в качестве материала для прочных корпусов глубоководного необитаемого аппарата Nereus, в которых размещалась электроника и аккумуляторные батареи. [35]

Некоторые технические характеристики существующих автономных подводных технических средств освоения океана с прочным корпусом из КМ и керамики сведены в таблицу 1.3.

Испытания подводных аппаратов с намотанными прочными корпусами из стеклопластика и углепластика на эпоксидном связующем и их успешная работа подтвердили, что могут быть достигнуты большие глубины, и показали перспективность КМ для изготовления прочных корпусов подводных лодок, аппаратов, станций и буровых платформ. Путем изготовления прочного корпуса из композиционных материалов достигается повышение полезной нагрузки необитаемого ПА.

Сегодня ученые разных стран мира продолжают разрабатывать новые проекты подводных лодок и аппаратов с прочными корпусами из УП. В Dutch Underwater Knowledge Centre (DUKC) [78] работают над созданием подводной системы разведки дистанционного зондирования REACH (Remote Evaluation and Acoustic Communication Hub) с максимальной глубиной погружения 250 м.

Согласно проекту [78] лодка состоит из 3 цилиндрических ПК диаметром 6 м, материалом которых может быть УП.

Таблица 1.3 – Технические характеристики автономных подводных технических средств освоения океана с прочными корпусами из ПКМ и керамики

№	Название подводного технического средства	Страна-владелец	Год постройки	Рабочая глубина, м	Длина, м	Вес, кг	Форма прочного корпуса	Материал прочного корпуса	Экипаж, человек
1	Deep Flight I	США	1990 - 1995	1000	4	1297	цилиндр*	СП + синтактная пена	1
2	Deep Flight Challenger	США	2005 - 2008	11000 (проектируемая)	5,4	2145,5	цилиндр*	УП	1
3	Autosub-1	Великобритания	1996	500	7	1578	цилиндр*	СП	-
4	Autosub-3	Великобритания	2000	1600	7	2400	цилиндр*	УП	-
5	Geosub	Великобритания	2005	2000 (проектируемая 3000)	6,82	2400	цилиндр*	УП	-
6	AUSS	США	1988 - 2000	6200 (max)	5,2	1270	цилиндр*	УП	-
7	Nereus	США	2007	11000	5	2800	цилиндр*	керамика	-
8	LR5	Великобритания	1978	500	9,2	21500	цилиндрический баллон давления	СП	2 (16)
9	LTS-7 GRZEŚ	Польша	1978	200	4	3000	сфера	3-слойный материал (СП на полиэфирном связующем + бальса)	2
Подводные планеры									
10	Deepglider	США	2006	6000 (достиг в 2010 г.)	1,8	62	веретенообразная	УП	-
11	Waldo	США	2010	1000	1,5	52	торпедообразная	УП	-
* – цилиндрический прочный корпус с титановыми оконечностями и/или кольцами из титанового сплава для соединения частей цилиндрического корпуса или иллюминатора									

На рис. 1.12 показан проект подводного необитаемого аппарата DeepC (Германия), состоящего из трех корпусов: две верхние силовые установки с придающими им вид углепластиковыми прочными корпусами и корпус с полезной нагрузкой. [79] Проектируемая рабочая глубина – 4000 м (предельная – 6000 м). Корпуса спроектированы как замкнутые цельные конструкции, чтобы минимизировать проблемы, связанные с высоким давлением.

В мае 2013 OceanGate (США) [80] анонсировала начало проекта обитаемого подводного аппарата Cyclops 3000 (рис. 1.13), прочный корпус которого спроектирован из УП. Проектируемая рабочая глубина – 3000 м.

При изготовлении ПК из СП и УП существуют такие же общие нерешенные проблемы, как и при проектировании высоконагруженных ответственных конструкций из ПКМ. Большое количество переменных и сложное напряженное состояние, которые присущи КМ, делают проектирование изделий из КМ слишком трудоемким, чем те же изделия из обычных изотропных материалов, и понимание этих проблем требует дальнейшего изучения, таких как:

- развитие технологии производства методом намотки очень толстых оболочек вращения (80 мм и больше), а также разработка методик расчета на прочность и устойчивость прочного корпуса из ПКМ с оптимизацией структуры композиционного материала;

- необходимость проверенных критериев разрушения композиционных материалов под действием комбинированных нагрузок;

- создание для проектировщиков базы данных по циклической и длительной нагрузке давлением различных композиционных материалов;

- неразрушающий контроль готового изделия и определение критических размеров дефектов. [45]

Концепция создания методом намотки тороидальной оболочки как прочного корпуса подводных технических средств отсутствует, остаются открытыми вопросы об рациональных значениях структурных и



Рисунок 1.12 – Проект необитаемого подводного аппарата DeepC [79]

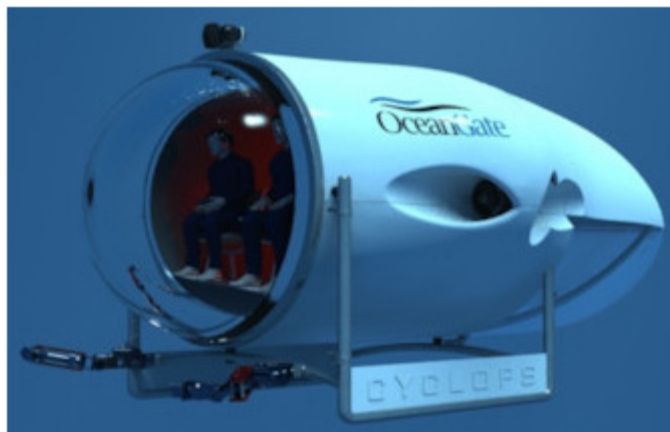


Рисунок 1.13 – Проект обитаемого подводного аппарата Cyclops 3000 [80]

технологических параметров намотанных тороидальных прочных корпусов с позиции прочности и устойчивости, не изучены их конкурентоспособность с прочными корпусами традиционных цилиндрической и сферической форм, а также конкурентоспособность тороидальных прочных корпусов из волокнистых ПКМ с аналогичными конструкциями из металлов. Проектирование рациональной структуры стенки корпуса из волокнистых ПКМ является необходимым условием для изготовления тороидального прочного корпуса, чтобы успешно конкурировать с металлическим аналогом и другими формами прочных корпусов для подводной техники. В настоящей работе определение «рациональное проектирование» означает отыскание в приближенной постановке наилучшего с позиции прочности, устойчивости, технологичности и минимума массы проекта тороидального прочного корпуса для подводных технических средств освоения океана.

1.3.3 Некоторые аспекты интеграции разъемных соединений в композитные прочные корпуса подводных технических средств освоения океана

Одним из серьезных препятствий на пути внедрении ПКМ является необходимость создания новых технологий их обработки, сборки и соединения конструкций из этих материалов. Важным фактором при проектировании ПК подводных аппаратов и конструкций из ПКМ является соединение частей композитной конструкции и интеграция разъемных соединений в композитный прочный корпус, не нарушая его герметичности. [81] Соединения вызывают снижение прочности и создают места концентрации напряжений, где может начаться усталостное разрушение, и к ним в ПКМ предъявляются больше требований, потому что ПКМ не хватает пластичности, чтобы перераспределять нагрузки, как в металлах.[82]

Сегодня в прочных корпусах проектируемых и уже построенных подводных аппаратов (Autosub-1 (см. рис. 1.8а); AUSS (см. рис. 1.9))

соединение частей конструкции прочного корпуса и подкрепления отверстий в корпусе обеспечивается простым и доступным вариантом – соединением композит/титан. Успешные испытания на разрушение были выполнены на цилиндрах диаметром 610 мм без разрушения места соединения. [82] На рис. 1.14 показана экспериментальная модель сферического прочного корпуса диаметром 1,22 м из углепластика AS4C/PPS, содержащая два больших отверстия на полюсах, подкрепленных титановыми кольцами. Эти кольца соединяют соседние отсеки.



Рисунок 1.14 – Экспериментальная модель сферического прочного корпуса из углепластика AS4C/PPS диаметром 1,22 м с титановыми подкрепляющими кольцами [82]

Готовый намотанный углепластиковый корпус (см. рис. 1.12) подводного обитаемого аппарата ДеерС разделен на 2 секции. Герметизацию двух секций прочного корпуса обеспечивают уплотнительные кольца и титановый фланец (рис. 1.15), в котором расположены все отверстия для соединения системы трубопроводов, информационных и силовых кабелей, находящихся внутри прочного корпуса, с отдельными внешними деталями и узлами. [79]

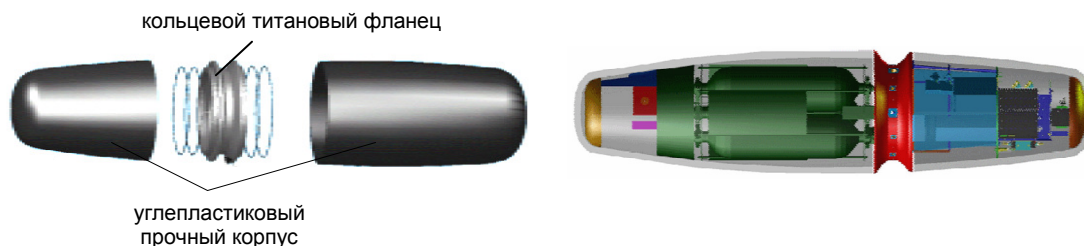


Рисунок 1.15 – Конструкция прочного корпуса подводного аппарата ДеерС (соединение прочного корпуса с помощью титанового фланца) [79]

Для соединения секций крупногабаритного тороидального прочного корпуса подводной станции [14], судна [10] в цельный корпус или подкрепления отверстий в корпусе может быть также использовано соединение композит/титан.

1.4 Обзор работ по исследованию устойчивости замкнутых изотропных и ортотропных тороидальных оболочек под действием внешнего равномерного давления

Основной нагрузкой для тороидального прочного корпуса подводного аппарата является гидростатическое давление, которое вызывает равномерное статическое обжатие прочного корпуса. При этом в прочном корпусе возникают значительные сжимающие напряжения. В этих условиях имеет место важная задача – проверка устойчивости обшивки прочного корпуса. Если жесткость при изгибе обшивки окажется недостаточной, то даже при относительно небольших сжимающих напряжениях может наступить потеря устойчивости обшивки (для оболочек из ПКМ – потеря монолитности), то есть обеспечение исходной формы упругого равновесия является первостепенной задачей. Многочисленные эксперименты показали, что при напряжениях, имеющих место на расчетной глубине, потеря устойчивости обшивки приводит к катастрофическому разрушению прочного корпуса. [6] Следовательно, критическая нагрузка для прочного корпуса опасна и вправе отождествляется с разрушающей. [6]

Согласно [6] расчет прочности пустотелых сфер из СП и титановых сплавов следует вести из условий устойчивости, из стали – по формулам устойчивости до расчетной глубины погружения $h_{sw} = 4200$ м, из алюминия – до $h_{sw} = 2650$ м. Для больших глубин расчет стальных и алюминиевых сфер необходимо вести из условий прочности по напряжениям. [6] Цилиндрические оболочки кругового поперечного сечения, толщина которых выбирается из условий прочности, оказываются весьма тонкими, поэтому важное значение приобретают вопросы устойчивости таких конструкций.

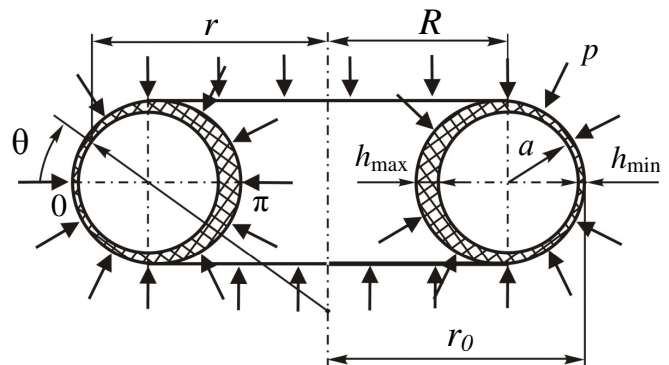
В связи с этим при проектировании прочных корпусов минимальной массы (тонкостенных) расчеты на устойчивость в общем объеме расчета несущей способности занимают одно из центральных мест.

Исследование неподкреплённых шпангоутами тороидов (рис. 1.16) в качестве формы прочных корпусов осложняется тем, что их срединная поверхность имеет участки положительной и отрицательной гауссовой кривизны.

Задача об устойчивости оболочек, представляющей собой тонкостенный замкнутый тор кругового поперечного сечения под действием равномерного внешнего давления решалась многими авторами.

Одними из первых важных работ в решении задачи устойчивости замкнутой изотропной тороидальной оболочки кругового поперечного сечения, находящейся под действием внешнего равномерного давления, были работы О. Махнига [83, 84]. В [83] изучались как осесимметричные, так и неосесимметричные формы потери устойчивости, используя линейные соотношения теории тонких упругих оболочек, предполагая докритическое напряжённое состояние безмоментным. [85] В результате произведённых расчётов О. Махниг пришёл к выводу о том, что осесимметричная форма потери устойчивости приводит к меньшей величине критической нагрузки, по сравнению с неосесимметричной формой. [85] Формула для критической нагрузки, полученная О. Махнигом, не содержит предельный случай - величину критической нагрузки для бесконечно длинной цилиндрической оболочки, нагруженной внешним давлением. [85]

П. Ф. Джорданом [86] на основе линейной теории пологих оболочек выполнен асимптотический расчёт осесимметричного выпучивания изотропной тороидальной оболочки круглого поперечного сечения, нагруженной постоянным внешним давлением и осевой силой, приложенной по экваторам. [85] Полученная



a – внутренний радиус сечения меридиана;
 R – расстояние от оси вращения до центра меридиального сечения;
 r_0 – максимальный радиус вращения;
 r – расстояние от оси вращения до некоторой точки срединной поверхности;
 h_{max} и h_{min} – наибольшая и наименьшая толщины стенки

Рисунок 1.16 – Геометрические параметры намотанного тороидального прочного корпуса с круговым поперечным сечением

П. Ф. Джорданом формула для критической нагрузки в зависимости от геометрических параметров изотропной тороидальной оболочки, модуля упругости и коэффициент Пуассона материала оболочки может быть верна только для ограниченного диапазона изменений геометрических параметров тороида, поскольку при $R \rightarrow \infty$ значение критической нагрузки равно нулю.

В работе [87] Л.Х. Собел искал решение линейных уравнений устойчивости тороидальных оболочек, предполагая докритическое напряженное состояние безмоментным, путем разложения в тригонометрические ряды в кольцевом и меридиональном направлениях компонент перемещений, которые возникают при выпучивании. Л.Х. Собелом рассматривались как осесимметричные, так и неосесимметричные формы потери устойчивости. [85]

Д. Бушнеллом [88, 89] рассмотрена аналогичная задача с использованием нелинейных деформационных соотношений.

Т.И. Кошелевой решение уравнений устойчивости в линейной постановке, предполагая начальное напряженное состояние безмоментным, получено методом Бубнова-Галеркина [90, 91]. В результате была получена аналитическая формула для величины критического давления в зависимости от геометрических параметров тороида, которая при $k \rightarrow 0$ давала формулу для критического давления бесконечно длинной цилиндрической оболочки, нагруженной внешним равномерным давлением. Результаты, полученные Т.И. Кошелевой, совпадают с результатами О. Махнига, но приблизительно в пять раз превосходят соответствующие величины критических давлений, полученных по формуле П.Ф. Джордана (1.1). Начальное моментное напряженное состояние рассматривалось Т.И. Кошелевой в работе [92].

Ю. А. Федосов [93 – 98] в аналогичной постановке Т.И. Кошелевой рассматривал задачу о неосесимметричной форме потери устойчивости тора под действием равномерной внешней нагрузки. Им установлено, что минимальная критическая нагрузка соответствует осесимметричной форме потери устойчивости – решению Т.И. Кошелевой в [91]. Ю. А. Федосовым также были проведены

эксперименты, но ему не удалось добиться удовлетворительного согласования теоретических и экспериментальных результатов.

А. Н. Фролов и Т.И. Ходцева [99], используя квадратичный вариант геометрически нелинейной теории тонких упругих непологих оболочек, разработанный Л.А. Шаповаловым [100], пришли к заключению, что максимальное различие моментного и безмоментного решений составляет приблизительно 25%; а при $k \rightarrow 0$ это различие становится незначительным.

А.В. Нетребко [85] на основе квадратичного варианта геометрически нелинейной теории пологих и непологих оболочек рассматривал осесимметричную форму потери устойчивости изотропной тороидальной оболочки кругового поперечного сечения, подвергнутой действию равномерного внешнего давления.

В [101] Э. И. Григолюком в линейной постановке решена задача об устойчивости трехслойной тороидальной оболочки.

В работах В.В. Гайдайчука, Е.А. Гоцуляка и В.И. Гуляева [102 – 104] методом продолжения решения по параметру описывается исследование закритического поведения изотропной тороидальной оболочки, нагруженной равномерным внешним давлением. Исследовано влияние переменной толщины на величину критической нагрузки. Закон распределения толщины был задан произвольным образом. Показано, что прощелкивание оболочек происходит посредством сдвига двух частей оболочки соответственно с отрицательной и положительной гауссовой кривизной относительно друг друга. Поэтому увеличение жесткости оболочки в зонах нулевой кривизны приведет к значительному возрастанию критического давления. На основании результатов работ предшествующих авторов за форму потери устойчивости в этих работах принималась осесимметричная форма, обратно симметричная относительно экваториальной плоскости.

Из анализа работ по устойчивости изотропных замкнутых круговых тороидальных оболочек, находящихся под действием внешнего равномерного давления видно, что изотропная тороидальная оболочка под действием

равномерной внешней нагрузки теряет устойчивость по осесимметричной форме, обратно симметричной относительно экваториальной плоскости, независимо от величины параметра k .

С появлением разнообразия композиционных материалов и их широким использованием в конструкциях различных областях техники в период с 1982 по 1988 годы были опубликованы результаты работ по исследованию влияния уровня ортотропии на устойчивость композитных замкнутых композитных тороидальных оболочек М.С. Ганеевой и Л.А. Косолаповой [105 – 107], А.С. Вольмиром и К.З. Хайрнасовым [108], Г.С. Погосьяном [109], М.В. Голдманисом [110].

В [105 – 107] М.С. Ганеевой и Л.А. Косолаповой численно исследовано напряженно-деформированное состояние и устойчивость полных ортотропных тороидальных оболочек постоянной толщины под действием равномерного внешнего давления на основе классической теории Кирхгофа-Лява и с учетом деформации поперечного сдвига. Построены ветви нагрузка-прогиб осесимметричной бифуркации решения с симметричной и кососимметричной относительно экваториальной плоскости формой выпучивания меридиана, найдены неосесимметричные критические нагрузки. Показано, что для ортотропных тороидальных оболочек, как и для изотропных, характерной является осесимметричная потеря устойчивости с кососимметричной формой выпучивания меридиана.

В работе [107] также М.С. Ганеевой и Л.А. Косолаповой исследовано влияние на напряженно-деформированное состояние и устойчивость полной ортотропной тороидальной оболочки постоянной толщины формы меридионального сечения и условий ее закрепления на внешнем экваторе. Для расчета основного состояния использована каноническая система уравнений, учитывающая моментность и геометрическую нелинейность. Нелинейная каноническая система решена методом линеаризации в сочетании с методами дополнительных функций и ортогональной прогонки. При решении канонических систем уравнений нейтрального равновесия определены критические нагрузки осесимметричной потери устойчивости с кососимметричной формой выпучивания

меридиана p_{0a} и неосесимметричные критические нагрузки p_{mn} ($m \geq 2$ – число полуволн потери устойчивости по параллели, n – число полуволн по меридиану).

При расчете полной тороидальной оболочки переменной толщины представляет интерес решение задачи о характере распределении материала вдоль меридиана с целью повышения критической нагрузки. Результаты расчетов круговых изотропных и ортотропных тороидальных оболочек постоянной толщины, находящихся под действием равномерного внешнего давления, показывают, что наиболее слабым местом таких оболочек является окрестность линий нулевой гауссовой кривизны [103, 104, 106]. Поэтому, распределив материал оболочки и увеличив ее толщину в окрестностях этих линий, можно ожидать изменения критической нагрузки в сторону увеличения.

В работе [106] М. С. Ганеевой и Л. А. Косолаповой численно решена задача о больших прогибах и устойчивости тонкой круговой упругой ортотропной тороидальной оболочки переменной толщины под действием равномерного внешнего давления. Закон распределения толщины вдоль меридиана, как и в [103], был взят произвольным. В соотношениях поставленной авторами задачи учтены геометрическая нелинейность по теории среднего изгиба и деформация поперечного сдвига по теории типа С.П. Тимошенко. Для расчета основного напряженно-деформированного состояния и определения бифуркационных нагрузок использованы канонические системы уравнений. [106] Нелинейная задача основного состояния решена численно методом линеаризации в сочетании с методами дополнительных функций и ортогональной прогонки. [106] Численные результаты показывают, что при увеличении толщины в окрестности экваторов (одинаково на внутреннем и внешнем) можно снизить уровень возникающих в тороидальной оболочке напряжений либо утолщением оболочки в полюсных точках увеличить критическую нагрузку. Также отмечено, что такое перераспределение материала наиболее эффективно для более тонкой оболочки. В работах [103, 104, 106] исследовано влияние изменения толщины круговой ортотропной тороидальной оболочки вдоль меридиана на устойчивость, законы распределения толщины были взяты произвольными.

В работах М.С. Ганеевой и Л.А. Косолаповой задачи решены в безразмерном виде, с соотношением осредненных модулей упругости материала вдоль главных линий кривизн θ и ψ по всему сечению тороидальной оболочки (см. рис. 1.16), рассматривались тороидальные оболочки с параметрами $\Delta = h/a = 0,01; 0,02; 0,05$ и $k = a/R = 0,05; 0,125; 0,25; 0,5; 1/3$, $E_\theta/E_\psi = 0,5; 1; 2$.

А.С. Вольмиром и К.З. Хайрнатовым [108] определена оптимальная с позиции устойчивости структура композиционного материала в тороидальной оболочке постоянной толщины. Композитная оболочка представлена в виде ортотропной системы, которая задана в виде совокупности усеченных конусов, соединенных по узловым окружностям. Задача решена методом конечных элементов для случая безмоментного основного состояния. Решение получено для неосесимметричной задачи при числе окружных волн $m = 2$. Рассматривались композиционный материал с такими осредненными характеристиками по всему сечению оболочки – 1) $E_\theta = 30$ ГПа, $E_\psi = 15$ ГПа; 2) $E_\theta = 15$ ГПа, $E_\psi = 30$ ГПа; сталь $E_\theta = E_\psi = 2,1 \cdot 10^5$ МПа. Авторами проведены численные исследования для оболочек с параметрами $k = 5/6; 0,5; 0,25; 0,125; 0,05$, $\Delta = h/a = 0,002; 0,005; 0,01; 0,02$.

В работе Г.С. Погосяна [109] на базе метода конечных элементов исследовано несимметричное выпучивание замкнутой тороидальной оболочки постоянной толщины кругового сечения под действием осесимметричного внешнего давления. В качестве материала для оболочки использован композиционный материал волокнистого строения – боралюминий ($E_M = 70$ ГПа, $\mu_M = 0,33$, $E_B = 413,4$ ГПа, $\mu_B = 0,2$). Исследования показали, что для тороидальных оболочек из боралюминия наименьшие критические давления при несимметричном выпучивании соответствуют $m = 2$ окружной гармонике и что интенсивность критического давления находится в определенной зависимости от соотношений k и Δ (при $k = \text{const}$ с ростом Δ интенсивность критического давления уменьшается, а при $\Delta = \text{const}$ с ростом k – увеличивается), а также что величина наименьшей критической нагрузки зависит кроме того, от расположения плоскости наибольшей жесткости материала и, что целесообразно ее располагать в меридиональном направлении.

Исследования устойчивости ортотропных тороидальных оболочек проведены авторами [105 – 109] для сравнительно небольшого количества геометрических параметров тороидальной оболочки и соотношения осредненных упругих характеристик композиционного материала. Способ формирования тороидальной оболочки, при котором будут получены такие соотношения модулей упругости материала, и, соответственно, структура материала (схема армирования и последовательность укладки слоев), вид наполнителей и связующего, не учитывался.

В [110] М.В. Голдманисом для оболочек вращения сконструирован конечный элемент, учитывающий деформацию поперечного сдвига и обжатие нормали, используя которую из условия минимума массы была проведена оптимизация геометрической формы меридиана поперечного сечения круговой тороидальной углепластиковой оболочки под действием равномерного внешнего давления при ограничениях на устойчивость. Указано, что оболочка получена методом намотки по геодезической линии под углом $\pm\varphi$ по отношению к ее вертикальному сечению. Характеристики однонаправленно армированного слоя (монослоя) из углепластика взяты следующие: $E_1 = 176,52$ ГПа, $E_2 = E_2 = 15,69$ ГПа, $\mu_{13} = 0,289$, $\mu_{31} = 0,026$, $\mu_{32} = 0,285$. Ограничения устойчивости вычисляются в сравнительно небольшом количестве по определенному плану выбранных точках пространства проектирования, а затем строится их приближенная регрессионная модель. В качестве параметров оптимизации намотанной тороидальной оболочки выбраны переменные a (горизонтальная полуось эллиптического поперечного сечения), b (вертикальная полуось эллипса), h_0 (толщина оболочки на внешнем экваторе) и φ_0 (угол намотки на внешнем экваторе), изменяющиеся в следующих пределах: $0,3 \text{ м} \leq a \leq 0,7 \text{ м}$, $0,3 \text{ м} \leq b \leq 0,7 \text{ м}$, $3 \text{ мм} \leq h_0 \leq 6 \text{ мм}$, $0^\circ \leq \varphi_0 \leq 15^\circ$. Автором установлено, что оптимальная форма меридиана по отношению к оси вращения оболочки имеет вид сплюснутого эллипса; намотку оболочки целесообразно проводить при малых углах укладки волокон; выигрыш в массе оптимальной оболочки с эллиптическим поперечным сечением по сравнению с оптимальной оболочкой

такого же занимаемого объема, но кругового поперечного сечения, в конкретном примере составляет 30%.

J. Blachut [25, 111, 112] исследовал численно статическую устойчивость углепластиковой тороидальной оболочки с осесимметричной формой потери устойчивости ($m = 0$), полученной методом симметричной спиральной намотки с усилением в меридиальном направлении $[90^\circ/60^\circ/-60^\circ]_s$, при действии внешнего равномерного давления.

При решении вопроса о применении стеклопластика или углепластика для прочных корпусов подводных лодок и подводных аппаратов в США и Великобритании, как основных производителей подводной техники с композитными прочными корпусами, основное внимание уделяется экспериментальным исследованиям. [23] Что касается теоретических методов расчета прочности и устойчивости корпусов из стеклопластика для подводной техники, то, судя по опубликованным данным, применяются, в основном, стандартные методы расчета для металлических прочных корпусов, вводя определенные коррективы на ортотропию материала. [55, 113]

В [113] даны формулы для прикидочных расчетов величины критического давления общей потери устойчивости гладкой и подкрепленной изотропных тороидальных оболочек кругового сечения под действием внешнего равномерного давления. Для расчетов использована формула Папковича для цилиндрической оболочки под внешним давлением с поправочным коэффициентом, поскольку тороид представлен изогнутым цилиндром.

Анализ работ, посвященных исследованию устойчивости тороидальных изотропных и ортотропных оболочек постоянной толщины под действием равномерного внешнего давления, показал, что для обоих видов оболочек характерной является осесимметричная потеря устойчивости с кососимметричной формой выпучивания меридиана. Опытные исследования нагружения внешним давлением изотропных замкнутых тороидальных оболочек с различными соотношениями геометрических параметров практически отсутствуют. Среди

имеющихся работ отметим [87, 98, 114], но проведенные опыты не вполне соответствуют теоретической схеме, относящейся к замкнутым оболочкам. Имеются противоречия в теоретических и в экспериментальных результатах по поводу форм потери устойчивости тороидальных оболочек как изотропных, так и ортотропных, хотя по величинам критических нагрузок наблюдается достаточно хорошее согласование результатов для изотропных оболочек. Как отмечено в [104, 105], на величину критической нагрузки потери устойчивости существенно влияют характер распределения материала в тороидальной оболочке и способ закрепления ее экваторов, что и является причиной трудности сравнения теоретических расчетов с результатами немногочисленных экспериментов. В [105] проведено сравнение теоретических результатов с результатами экспериментов, полученных Ю. А. Федосовым при испытании полных изотропных тороидальных оболочек кругового сечения [93], отмечается хорошее согласование, несмотря на заметный разброс экспериментальных результатов.

Информация об экспериментальных исследованиях композитных замкнутых тороидальных оболочек, нагруженных внешним равномерным давлением, по нашим данным отсутствует.

При изготовлении тороидальных сосудов давления методом непрерывной намотки волокон или армированной ленты формируется слоистая структура с переменной толщиной стенки с разнородной структурой материала вдоль меридиана. При этом толщина оболочки увеличивается от внешнего экватора к внутреннему. [53, 57] Из проведенного выше анализа основных работ по устойчивости круговых замкнутых тонкостенных тороидальных оболочек, подвергнутых действию равномерного внешнего давления, следует, что исследования намотанных тороидальных оболочек с учетом особенностей слоистой структуры и анизотропии материала, конструктивно-технологических ограничений, возникающих при намотке, практически отсутствуют. Не изучено влияние неоднородности структуры материала, а также разнотолщинности поперечного сечения при различных схемах намотки на устойчивость намотанной тороидальной оболочки при гидростатическом сжатии. Это и

составляет новое направление в исследовании устойчивости намотанных тороидальных оболочек из армированных композиционных материалов. Имеющиеся на сегодняшний день исследования в области проектирования намотанных тороидальных оболочек из армированных композиционных материалов не позволяют в полной мере решить вышеуказанные вопросы. Отсутствуют исследования эффективности реализации тороидального прочного корпуса, выполненного намоткой из волокнистых КМ, с аналогичным металлическим корпусом. Это делает актуальной задачу разработки методики расчета на устойчивость и рационального проектирования прочных тороидальных корпусов из стеклопластика и углепластика с учетом конструктивно-технологических ограничений при намотке тороидов.

Результаты данного раздела опубликованы в работах [11, 23, 24, 81].

1.5 Постановка задач научного исследования

Согласно проведенному анализу в диссертационной работе ставятся следующие задачи:

1. Теоретическое обоснование и разработка математической модели потери устойчивости при гидростатическом сжатии полученной методом намотки из однонаправленных композиционных материалов замкнутой круговой тороидальной оболочки, которая бы учитывала слоистую структуру полимерного композиционного материала и переменность толщины в намотанном тороиде; выбор метода решения задачи устойчивости.

2. Получение аналитического решения для верхнего критического давления потери устойчивости тороидального прочного корпуса при гидростатическом сжатии, на базе которого выявить его зависимость от схемы намотки, геометрических параметров тороида, перспективных типов армирующего наполнителя и связующего, переменности толщины намотанного корпуса.

3. Разработка расчетной аналитической методики проектирования тороидального прочного корпуса при ограничении по прочности и устойчивости для подводных аппаратов, которая включает рациональный выбор конструкционных материалов и схем армирования полимерных композиционных материалов с учетом конструктивно-технологических особенностей формообразования корпуса методом намотки; ее апробация на тестовых примерах.

4. Оценка технико-экономической эффективности применения высокопрочных материалов для тороидальных прочных корпусов при ограничении по прочности и общей устойчивости с целью создания рациональных в весовом и технологическом отношениях корпусов в зависимости от глубины эксплуатации на начальной стадии проектирования.

РАЗДЕЛ 2

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ТОРОИДАЛЬНЫХ ПРОЧНЫХ КОРПУСОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ НАМОТКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Во втором разделе рассмотрены технологические схемы получения тороидальных оболочек методом непрерывной намотки волокон и армированной ленты.

Теоретические исследования и аналитические зависимости, полученные ранее М.А. Комковым (Россия), Lei Zu (Китай) и др. [53, 54 – 59], позволяют разработать методику проектирования тороидального прочного корпуса, получаемого из ПКМ методом намотки. Основопологающим принципом такой методики должен быть принцип учета возможных технологических схем армирования при проектных расчетах несущей способности оболочки прочного корпуса в форме тора.

2.1 Конструктивно-технологический анализ намотки тороидальных прочных корпусов

Потенциальные возможности проектирования и изготовления методом непрерывной намотки тороидальных прочных корпусов, находящихся под действием гидростатического давления, исходят из исследований в области намотанных конструкций контейнеров для хранения и подачи газа в форме тора, находящихся под внутренним давлением [53, 54 – 62], а также различных криволинейных трубопроводов, содержащих цилиндрические и тороидальные участки [115, 116].

Метод непрерывной намотки жгутом или лентой тороида, отличаясь большими возможностями, однако, не позволяет реализовать любые, в том числе и достаточно эффективные схемы армирования, т. е. имеет ограничения,

которые должны быть учтены в процессе проектирования тороидального прочного корпуса. [53]

Согласно [53] при изготовлении тороидальной оболочки (ТО) методом непрерывной намотки волокон или армированной ленты на оправку возможно реализовать следующие технологические схемы армирования: перекрестная спиральная намотка (геодезическая, равновесная), продольно-поперечная и комбинированная намотки (когда слои, уложенные перекрестно-спиральной намоткой, усилены поперечными слоями).

Тороидальный ПК имеет замкнутую поверхность, потому материал оправки должен быть из растворимых или плавких материалов. Для намотки тороидальных сосудов давления используют в основном песчано-полимерные вымываемые оправки. [53]

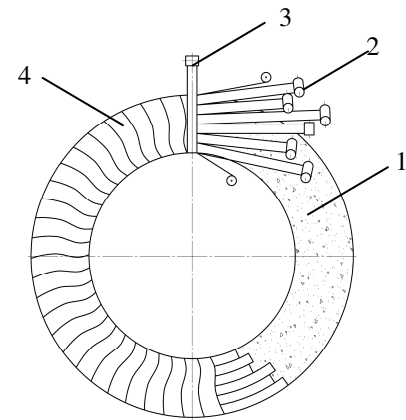
2.1.1 Конструктивно-технологический анализ замкнутой круговой тороидальной оболочки, сформированной продольно-поперечной схемой армирования

На тороидальных оболочках методом совместной намотки может быть реализована продольно-поперечная схема армирования [53] (далее в тексте процесс формирования стенки тороидальной оболочки по продольно-поперечной схеме армирования называется продольно-поперечной намоткой) (рис. 2.1). По утверждению авторов в [53] одновременное формирование продольного и поперечного слоев (рис. 2.2 *a*) сокращает время, затрачиваемое на процесс намотки композитной оболочки, по сравнению со спиральной намоткой одной лентой.

В работе [119] описано изготовление намотанных тороидальных сосудов давления, где в качестве оправки служит тороидальная оболочка, собранная из четырех элементов, полученных отдельно продольной намоткой и выкладкой, и которая остается в составе конструкции.

При продольно-поперечной намотке тороидальной оболочки полученный композиционный слоистый материал будет состоять из $2l_1$ чередующихся монослоев, из которых продольные монослои наматываются под углом $\varphi = 90^\circ$, а поперечные – под углом $\varphi = 0^\circ$ (см. рис. 2.2а) с возможным последующим усилением в поперечном направлении количеством монослоев l_2 .

В работе при рассмотрении структуры стенки намотанной круговой тороидальной оболочки монослоем считается один слой полимерного композиционного материала, сформированный однонаправленным армирующим материалом (лентой) при намотке (укладке) одного цикла на замкнутую тороидальную оболочку.



1 – оправка;

2 – катушки продольных лент;

3 – катушка поперечной ленты;

4 – наматываемая оболочка

Рисунок 2.1 – Технологическая схема изготовления круговой тороидальной оболочки с продольно-поперечной схемой армирования

Продольный монослой имеет постоянную толщину по всему сечению тороидальной оболочки:

$$h_{\text{прод}} = h_1 = \text{const} \quad (2.1)$$

где $h_1 = \text{const}$ – толщина однонаправленного КМ (армирующей ленты).

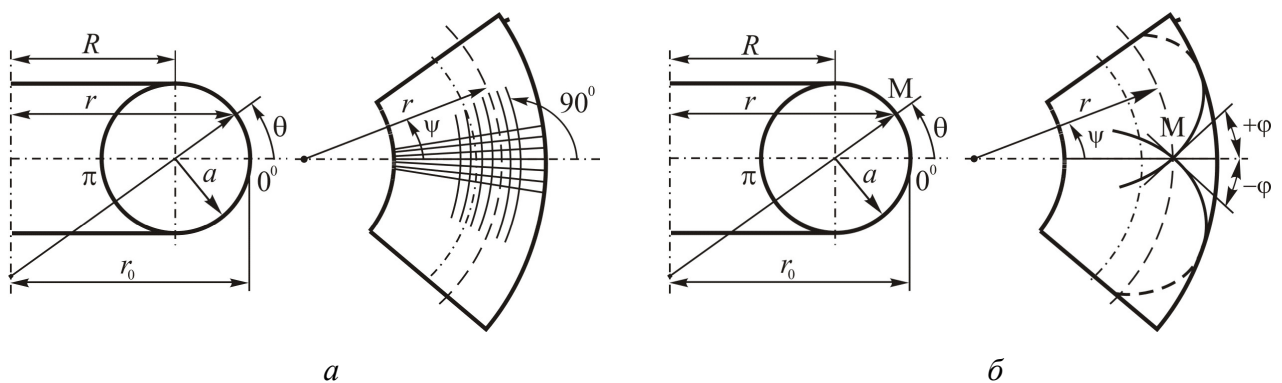


Рисунок 2.2 – Схема продольно-поперечной (а) и спиральной (б) намотки круговой тороидальной оболочки

При продольно-поперечной намотке поперечный монослой, уложенный вдоль меридиана, будет иметь переменную толщину за счет более плотной упаковки на внутреннем экваторе оболочки ($0 \leq k = \frac{a}{R} \leq 0,5$) (рис. 2.2 а) [54]:

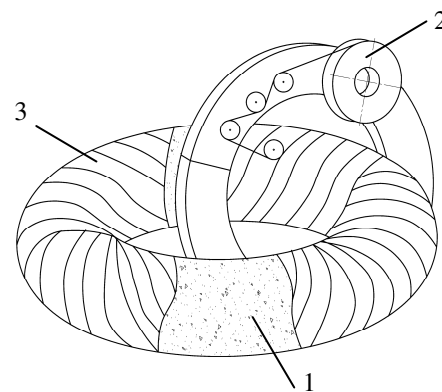
$$h_{\Pi}(\theta, k) = h_1 \frac{1+k}{1+k \cdot \cos \theta}. \quad (2.2)$$

При одинаковом материале всех монослоев масса тороидального корпуса, изготовленного непрерывной намоткой, зависит от структуры композиционного материала, то есть от количества слоев, от углов их армирования и геометрии тороидальной оболочки; при этом формируется структура с переменной толщиной стенки вдоль меридиана.

2.1.2 Конструктивно-технологический анализ замкнутой круговой тороидальной оболочки, получаемой спиральной намоткой

Спиральная намотка (рис. 2.3) – симметричная укладка нити (ленты), при которой стенка многослойного материала формируется парами одинаковых монослоев (однонаправленных композиционных материалов), укладываемых под углами $\pm \varphi$ к меридиану (рис. 2.2, б). В зависимости от схемы спиральной намотки различают равновесную и геодезическую намотки. [117, 118]

Авторами работ [53, 57] оценено влияние технологических факторов процесса намотки на конструктивное совершенство круговых тороидальных оболочек, применяемых в качестве сосудов давления для хранения и транспортировки жидких и газообразных продуктов, и определены теоретически конструктивно-технологические ограничения, связанные с намоткой круговых тороидальных оболочек; а также экспериментально



1 – оправка; 2 – катушка с лентой;
3 – наматываемая оболочка
Рисунок 2.3 – Спиральная намотка замкнутой тороидальной оболочки

определена точность углов намотки нитей на торовую оправку. Анализ результатов проведенных авторами в работах [53, 57] экспериментов показывает, что в случае намотки с соскальзыванием равновесная кривая стремится к положению геодезической линии на поверхности тора. Кроме того, намотка по геодезическим линиям является наиболее приемлемой, так как позволяет укладывать нити на оправку без соскальзывания и с необходимым натяжением.

Такой же результат исследования намотки тороидальных сосудов с применением двух систем нитей, симметрично расположенных относительно меридиана, описан в [55]. Авторы в [55] отмечают, что при симметричной намотке должны выполняться два основных требования: статическое равновесие в каждой точке, которое определяет угол между двумя нитями, и устойчивость нитей на поверхности, которая выполняется при укладке нитей по геодезической линии. По мнению автора в [55] при заданном уравнении поверхности эти два требования обычно несовместимы, поэтому чтобы согласовать равновесие усилий с правильной укладкой нитей необходимо дать некоторую свободу при определении геометрии тороидальной поверхности.

Закон распределения толщины монослоя по меридиану спиральной геодезической намотки ($0 \leq k \leq 0,45$) [57]:

$$h_{SG}(\theta, k) = h_1 \frac{(1+k)\cos\varphi_0}{(1+k \cdot \cos\theta)\cos\varphi_G} = h_1 \frac{(1+k)\cos\varphi_0}{\sqrt{(1+k \cdot \cos\theta)^2 - (1+k)^2 \sin^2\varphi_0}}, \quad (2.3)$$

где φ_0 - угол армирования на максимальном радиусе (экваторе) тороидальной оболочки при $r = r_0 = R + a$.

Начальный угол геодезической намотки φ_0 для тороидальных оболочек кругового сечения может быть найден по приближенной формуле [57]:

$$\varphi_{0G} = \arcsin \left[\frac{1-k}{\sqrt{3+5 \cdot k^2}} \right]. \quad (2.4)$$

Формула (2.4) справедлива во всем диапазоне значений $0,05 < k < 0,5$ и позволяет получать значение угла φ_0 с точностью до 1%. [57]

При равновесной схеме армирования закон распределения толщины монослоя по меридиану ($0 \leq k \leq 0,25$) [57]:

$$h_{SR}(\theta, k) = h_1 \frac{(1+k)\cos\varphi_0}{(1+k \cdot \cos\theta)\cos\varphi_R} = h_1 \frac{(1+k)\sqrt{\frac{2+k}{3+2k}}}{(1+k \cdot \cos\theta)\sqrt{\frac{2+k \cdot \cos\theta}{3+2k \cdot \cos\theta}}} \quad (2.5)$$

Согласно [57] законы изменения углов намотки на круговом торе $\varphi(\theta, k)$, входящие в (2.3) и (2.5):

- по геодезической линии (рис. 2.4):

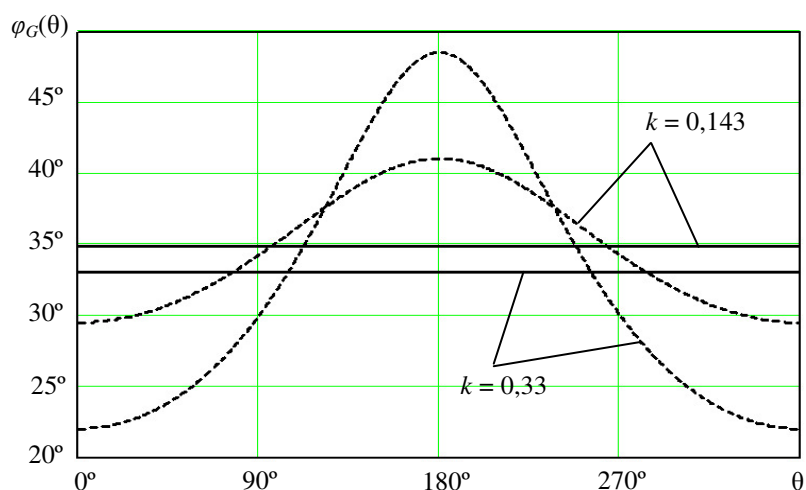
$$\varphi_G(\theta, k) = \arcsin \left[\frac{1-k^2}{\sqrt{2+k^2} \cdot (1+k \cdot \cos\theta)} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \right];$$

- по равновесной кривой (рис. 2.5):

$$\varphi_R(\theta, k) = \arctg \sqrt{\frac{1+k \cdot \cos\theta}{2+k \cdot \cos\theta}}.$$

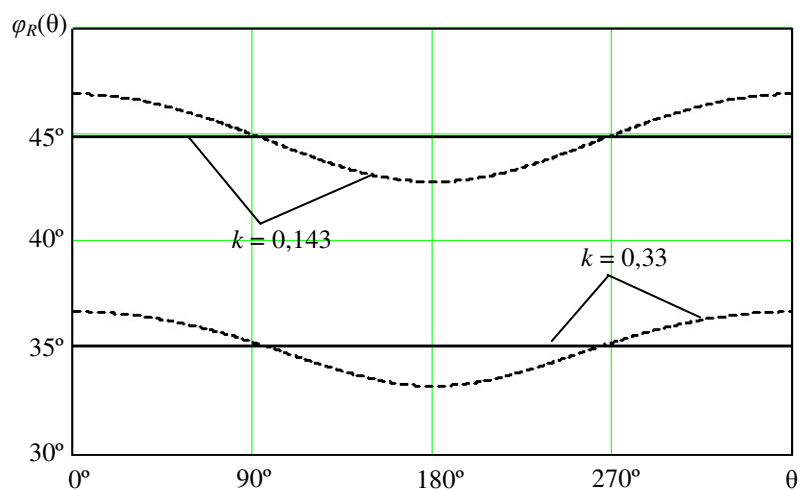
В работах [53, 57], где проанализирован опыт формообразования круговых тороидальных сосудов давления методом намотки из волокнистых ПКМ с различными схемами армирования, авторы указывают на наличие ряда ограничений конструктивно-технологического характера: по неравнонапряженности нитей; по предельному углу намотки, по коэффициенту трения в случае намотки тороидальных оболочек не по геодезическим линиям поверхности (геодезическое отклонение).

Предельные углы намотки связаны с тороидальной формой поверхности и геометрическими параметрами оболочки. Как указано авторами в [53], для тороидальных оболочек существуют максимальные или предельные углы намотки $\varphi_{пр}$, в случае превышения которых нити перестают касаться поверхности оправки на ее внутренней стороне в диапазоне углов $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ($\theta = 0^\circ$ – на большом экваторе). Согласно [53] круговой тор с параметрами $k > 0,45$ наматывать по геодезической кривой равнонапряженных торов нельзя.



— - φ_{Gm} (средний угол по меридиану); - - - - $\varphi_G(\theta)$

Рисунок 2.4 – Изменение углов намотки $\varphi_G(\theta, k)$ на круговом торе с $k = 0,143$ и $k = 0,33$ от координаты θ по геодезической линии



— - φ_{Rm} (средний угол по меридиану); - - - - $\varphi_R(\theta)$

Рисунок 2.5 – Изменение углов намотки $\varphi_R(\theta, k)$ на круговом торе с $k = 0,143$ и $k = 0,33$ от координаты θ по геодезической линии

По мнению авторов в [53] геодезическое отклонение (коэффициент трения) при намотке нитей на тороидальную оболочку связано с соскальзыванием нитей с ее поверхности в случае намотки не по геодезическим кривым. Как указано в [53], возможность намотки без соскальзывания определяется коэффициентом трения $f_{тр}$ армирующего наполнителя о поверхность оправки и между собой, значение которого зависит как от натяжения нитей при намотке, так и от вида армирующих волокон, состояния

связующего, свойств материала поверхности оправки и в каждом конкретном случае определяется экспериментально. Максимальное значение угла геодезического отклонения уменьшается при $k \rightarrow 0$. [53]

При создании конструкций из однонаправленных КМ, как известно из [55], максимально допустимые углы трения при намотке лежат в пределах $12...15^\circ$ ($f_{TP}^{Don} = 0,2...0,28$). Это обстоятельство ограничивает возможность изготовления намоткой по равновесной кривой круговых торовых оболочек с параметрами $k > 0,2...0,25$. [53]

2.2 Выбор расчетной модели структуры стенки композитного тороидального прочного корпуса, выполненного намоткой

При математическом моделировании поведения под нагрузкой оболочечных конструкций из гомогенных изотропных материалов учитываются физико-механические свойства материала, геометрия и толщина оболочки, а из волокнистых ПКМ – необходимо учитывать еще и анизотропию и состав структуры ПКМ.

При упрощенном моделировании анизотропная конструкция заменяется конструкцией квазиизотропной или квазиортотропной структуры (макроструктурный подход), но это не позволяет в полной мере реализовать возможности создания оптимальной конструкции из волокнистых ПКМ. М.С. Ганеевой, Л.А. Косолаповой, А.С. Вольмиром, К.З. Хайрнасовым, Г.С. Погосяном и другими при исследовании устойчивости композитной тороидальной оболочки, находящейся под действием внешнего равномерного давления, структура материала рассматривалась как квазиортотропная, то есть толщина стенки – один ортотропный слой.

При создании тороидальных прочных корпусов из композитов конструкторские и технологические вопросы не могут рассматриваться изолированно, что допускается при создании конструкций из металлов [57].

Формирование структуры стенки из ПКМ обусловлено технологическими возможностями формообразования оболочечной конструкции.

Поэтому реализация перспектив, которые открываются в связи с внедрением композитных материалов как конструкционных материалов для тороидальных прочных корпусов подводных технических средств, обуславливает необходимость создания расчетных схем для исследования напряженно-деформированного состояния и устойчивости проектируемого тороидального прочного корпуса. Расчетная схема оболочки существенным образом зависит от принятой модели структуры материала. А поскольку метод намотки обеспечивает широкий выбор армирующего наполнителя и полимерных связующих, принятая модель должна это учитывать.

В зависимости от технологической схемы намотки тороидальной оболочки формируется структура с неоднородными упругими и прочностными свойствами, а от упругих свойств композиционного материала зависят величины напряжений и критического давления при расчете задач прочности, жесткости и устойчивости.

ПКМ проницаемы при высоком давлении. Оболочечные конструкции из них, работающие при высоком внутреннем или внешнем давлении, нуждаются в герметизации. Герметичность анизотропного сосуда давления может быть обеспечена повышением монолитности (сплошности) ПКМ [120] или применением герметизирующего слоя. Очень тонкий герметизирующий слой (лейнер) может быть металлическим (сталь, алюминиевые сплавы) или полимерным (из термопластичных материалов таких, как полиэтилен, полиимид, лавсан и другие). [51, 121]

Тем не менее, в литературе описаны прочные корпуса, при изготовлении которых лейнер не применялся. Согласно [37] для изготовления цилиндрического прочного корпуса методом намотки для необитаемого подводного аппарата AUSS с рабочей глубиной погружения 6000 м герметизирующий слой не применялся; была реализована технологическая монолитность, поскольку метод намотки обеспечивает высокий уровень

качества материала корпуса. Толщина стенки намотанного прочного корпуса аппарата AUSS – $h = 63,5$ мм, $\Delta = h/a = 0,194$.

Влияние герметизирующего слоя на несущую способность тороидальной оболочки из ПКМ из-за его малой толщины в настоящей работе не рассматривается.

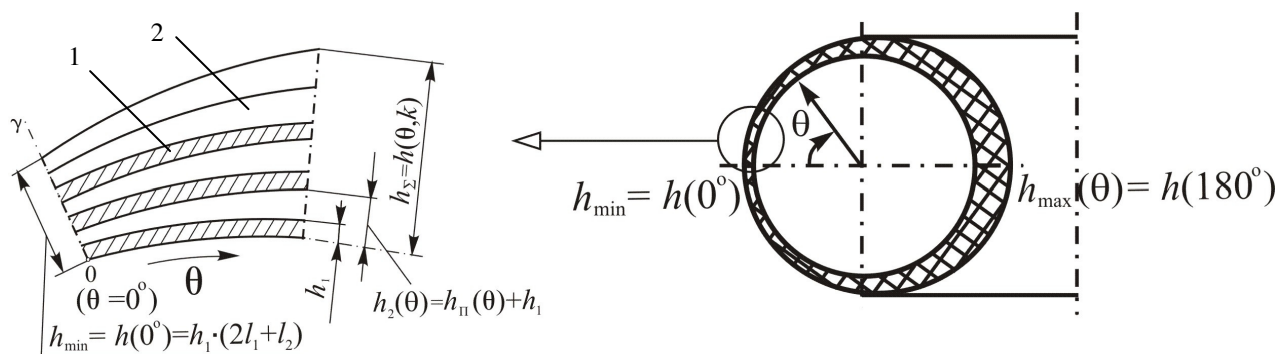
В работе намотанный тороидальный прочный корпус в силу особенностей технологии изготовления рассматривается как слоистая ортотропная оболочка с переменной толщиной стенки вдоль меридиана, увеличивающейся от внешнего экватора к внутреннему (см. рис. 2.2). И расчет упругих характеристик материала стенки намотанных тороидальных оболочек проводится путем сведения их реальной структуры к слоистой модели [122–125], которая состоит из монослоев фиксированной толщины. Такую структуру для математического моделирования задач оптимизации конструкций из волокнистых ПКМ называют дискретной, а совокупность этих принятых положений - дискретно-структурной теорией. При этом рассматриваются однонаправленно армированные композиционные материалы (монослои), волокна которых являются упругими изотропными (стекловолокно), упругими анизотропными (борное и углеродное волокно) материалами, а связующее является изотропным материалом, обладающим вязкоупругими свойствами (например, эпоксидное связующее).

Другим важным аспектом моделирования структуры стенки из композиционного материала является то, что толщина должна быть кратной толщине монослоя полуфабриката (армированной ленты), а для структур композиционного материала $[\pm\varphi]$ – толщина должна быть кратной четному числу монослоев.

На основе дискретно-структурной теории принята расчетная модель структуры ортотропного КМ, учитывающая законы распределения толщин монослоев вдоль меридиана при ППН (см. рис. 2.1) и перекрестной спиральной намотке, описанных М. А. Комковым при исследовании конструктивно-технологических особенностей намотки тороидальных баллонов давления

кругового поперечного сечения. Причем, главные оси ортотропии совпадают с направлением главных кривизн поверхности тороида.

На рис. 2.6 показана дискретная расчетная модель структуры слоистой стенки тороидальной оболочки, полученной продольно-поперечной намоткой с вариантом дополнительного поперечного усиления.



1 – продольный монослой; 2 – поперечный монослой

Рисунок 2.6 – Дискретная расчетная модель слоистой стенки переменной толщины для тороидального корпуса, выполненного ГПН

Слоистая стенка состоит из чередующихся монослоев постоянной и переменной толщины (см. рис. 2.6), обладающих свойствами армирующего материала и связующего. При разработке дискретных расчетных моделей структуры стенки намотанного тороидального корпуса с переменной толщиной в качестве проектных параметров, описывающих порядок чередования монослоев, взяты толщина продольного монослоя $h_1 = \text{const}$ (толщина монослоя при угле $\theta = 0^\circ$) и количество монослоев, укладываемых в каждом из направлений армирования.

2.3 Анализ распределения эффективных упругих постоянных многослойного композитного образца в зависимости от технологической схемы намотки

Исследуется распределение модулей упругости E_θ , E_ψ многослойного ортотропного ПКМ в меридиальном и продольном направлениях в зависимости

от технологической схемы намотки, способа и угла укладки волокон или ленты на экваторе тороида.

Порядок чередования монослоёв в пакете многослойного материала не имеет значения при подсчёте его жесткостей. Общее количество слоёв l_{Σ} в пакете определяется, как сумма монослоёв, уложенных с одинаковыми углами φ , например, $l_{\Sigma} = l_0 + l_{90} + l_{\varphi}$, где l_{90} – количество монослоёв, уложенных под углом 90° , l_0 – количество монослоёв, уложенных под углом 0° , l_{φ} – количество монослоёв под углом $\pm\varphi$.

С достаточной для проектировочных расчётов точностью приближенно эффективные упругие постоянные E_{θ} , E_{ψ} ортотропного ПКМ определяются по формулам:

$$E_{\psi} = B_{\psi\psi} - \frac{B_{\psi\theta}^2}{B_{\theta\theta}}; \quad E_{\theta} = B_{\theta\theta} - \frac{B_{\psi\theta}^2}{B_{\psi\psi}}, \quad (2.6)$$

$$\text{где } B_{jf} = \sum_{i=1}^t B_{jf}^i \bar{h}_i(\theta, k);$$

$$\bar{h}_i(\theta, k) = \frac{h_i}{h_{\Sigma}} - \text{относительная толщина } i\text{-слоя};$$

$$h_{\Sigma}(\theta, k) - \text{общая толщина пакета слоёв};$$

$$h_i = h_i^M \cdot l_{\varphi_i} - \text{толщина } i\text{-слоя};$$

$$h_i^M - \text{толщина монослоя};$$

l_{φ_i} – количество монослоев в слое, уложенном в направлении армирования φ_i ;

t – общее количество слоёв в пакете, уложенных в направлении армирования φ_i [118].

Модули упругости многослойного пакета зависят от жесткостных характеристик слоёв определённой ориентации и от соотношения толщины этих слоёв в общей толщине пакета. Жесткостные характеристики i -монослоя в системе координат тороидальной оболочки θ, ψ (рис. 2.7) при произвольном расположении армирующих элементов находятся на основании известных

геометрических соотношений, определяющих преобразование упругих постоянных при повороте осей координат [126]:

$$\left. \begin{aligned}
 B_{\psi\psi}^i &= \bar{E}_1^i \sin^4 \varphi_i + 2\bar{E}_3^i \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i + \bar{E}_2^i \cos^4 \varphi_i; \\
 B_{\theta\theta}^i &= \bar{E}_1^i \cos^4 \varphi_i + 2\bar{E}_3^i \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i + \bar{E}_2^i \sin^4 \varphi_i \\
 B_{\psi\theta}^i &= \bar{E}_1^i \mu_{21} \cdot (\sin^4 \varphi_i + \cos^4 \varphi_i) + \left(\bar{E}_1^i + \bar{E}_2^i - 4 \cdot G_{12} \right) \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i; \\
 B_{ss} &= G_{12} + \left(\bar{E}_1^i + \bar{E}_2^i - 2\bar{E}_3^i \right) \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i, \\
 \bar{E}_1 &= \frac{E_{1M}}{1 - \mu_{21}\mu_{12}}; \quad \bar{E}_2 = \frac{E_{2M}}{1 - \mu_{21}\mu_{12}}; \quad \bar{E}_3 = 2G_{12M} + \bar{E}_1\mu_{21}.
 \end{aligned} \right\} (2.7)$$

Упругие характеристики однонаправленно армированного слоя (монослоя) E_{1M} , E_{2M} , (в направлении вдоль (индекс 1) и поперек (индекс 2) армирования соответственно) и μ_{21} определяются, используя феноменологический подход к определению упругих постоянных монослоя, основанный на расчетно-экспериментальных методах [126], или рассчитываются по свойствам компонентов, используя соотношения В.В. Болотина [125]. При использовании феноменологического подхода становится возможным учесть

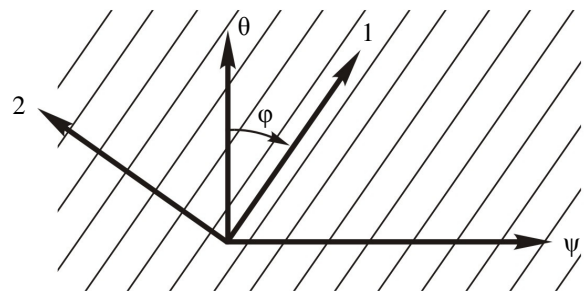


Рисунок 2.7 – Системы координат, связанные с конструкцией (θ, ψ) и армирующими волокнами (1, 2)

такие трудно поддающиеся расчету технологические факторы, как натяжения ленты при намотке, давление прессования, режим полимеризации и другие параметры, влияющие на механические характеристики композита после отверждения [126]. Выражения В.В. Болотина для эффективных упругих постоянных монослоя дают в конечном счете удовлетворительную для практических расчетов точность, особенно если учесть большой разброс опытных данных и высокую чувствительность этих данных к технологическим факторам (например, к искривлениям волокон, несовершенной адгезии и т.д.) :

$$\left. \begin{aligned} E_{1M} &= E_B \eta + (1 - \eta) \cdot E_M; & E_{2M} &\approx \frac{E_B E_M}{\eta \cdot E_M + (1 - \eta) \cdot E_B}; & \mu_{12M} &= \mu_B \cdot \eta + (1 - \eta) \cdot \mu_M; \\ \mu_{21M} &= \frac{\mu_{12} E_2}{E_1}; & G_{12M} &= \frac{G_B G_M}{\eta \cdot G_M + (1 - \eta) \cdot G_B}; & G_B &= \frac{E_B}{2(1 + \mu_B)}; & G_M &= \frac{E_M}{2(1 + \mu_M)}, \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

где η – относительное объемное содержание армирующего материала [125].

Буквенные индексы В и М в формулах (2.8) указывают на принадлежность к волокну и матрице соответственно.

Подставляя формулы (2.1 – 2.5) и (2.7, 2.8) в (2.6), получим для перекрестной спиральной (геодезической и равновесной) и продольно-поперечной схем намотки зависимости эффективных упругих постоянных E_0 , E_ψ вдоль линий главных кривизн от угла укладки волокон на экваторе при разных геометрических параметрах k тороидальной оболочки с учетом объемной доли наполнителя и переменности толщины.

В качестве примера для анализа упругих характеристик рассмотрены намотанные тороидальные ПК из СП и УП на эпоксидном связующем, так как КМ на их основе обладают высокой прочностью при сжатии и сдвиге.

Армирующий наполнитель для композиционных материалов, из которых необходимо спроектировать прочный корпус подводного технического средства, конструкции, должен сочетать высокие прочность и модуль упругости. Наиболее известными производителями высокомодульных высокопрочных углеродных волокон на основе ПАН-волокон в настоящее время являются компании Toray (Япония, торговая марка TORAYCA®) [127], TohoTenax (Япония) [128], Nippon Graphite Fiber Corporation (Япония) [125], Cytec (США) [130], Mitsubishi (Япония, торговая марка DIALEAD™) [131], Hexcel (США, торговая марка HexTow®) [132].

Углеродные волокна имеет самый широкий диапазон прочности и жесткости, чем все другие волокна, используемые в армированных композиционных материалах. Ассоциацией производителей углеродных волокон Японии (Japan Carbon Fiber Manufacturers Association (JCMA)) предложена такая классификация углеродных волокон: низкомодульные

($E_{yB} = 40 \dots 200$ ГПа), стандартные, средние по модулю, высокомодульные и сверхвысокомодульные [133]. Эта классификация не относится к стандарту по методике испытаний, поэтому значения модуля упругости для каждого класса от разных производителей могут отличаться от указанных пределов в каждом классе [133]. Прочность на растяжение высокомодульных и сверхвысокомодульных ($E_{yB} = 600 - 965$ ГПа) волокон одинаковы или ниже прочности стандартных или средних по модулю углеродных волокон. Прочность на сжатие высокомодульных углеродных волокон составляет 1,7 ГПа, сверхвысокомодульных – 0,5 ГПа [134].

Взяты для расчета свойства армирующих наполнителей E_B и связующего E_M , рекомендованные производителями для получения намотанных конструкций из ПКМ, указаны в таблице 2.1. Относительное объемное содержание волокон принято в расчетах $\eta = 0,6$.

Таблица 2.1 – Свойства армирующих наполнителей и связующего, используемые в расчетах

Марка компонента	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Прочность при растяжении, ГПа
Высокомодульное и высокопрочное волокно из S-стекла ВМПС (ОАО "НПО Стеклопластик", Россия) [135]	93	0,32	4,5 – 4,75
Углеродное высокомодульное волокно M35J (TORAYCA®) [127]	343	0,31	4,7
Углеродное высокопрочное волокно HexTow® IM10 [132]	303	0,31	6,964
Углеродное сверхвысокомодульное волокно CN-90 (Nippon Graphite Fiber Corporation) [129]	860	0,31	3,43
Эпоксидная смола ЭДТ-10 [53]	3	0,32	0,07

Цилиндрический прочный корпус автономного необитаемого подводного аппарата AUSS (США) с максимальной глубиной погружения 6200 м изготовлен «мокрой» продольно-поперечной намоткой углепластиковой ленты из высокомодульного высокопрочного волокна (свойства монослоя –

$E_{1м} = 189 \text{ ГПа}$, $E_{2м} = 10,7 \text{ ГПа}$, $\mu_{12} = 0,311$). [13, 37] Поэтому углепластик рассматривался на основе высокомодульных высокопрочных углеродных волокон и сверхвысокомодульных, рекомендуемых производителями (табл. 2.1) для формования конструкций методом намотки. Свойства монослоев из УП М35J/ЭДТ-10 и CN-90/ЭДТ-10 определены по формулам (2.8). Для СП ВМПС/ЭДТ-10 взяты свойства монослоя, полученные расчетно-экспериментальным методом [53]: $E_{1м} = 57,2 \text{ ГПа}$, $E_{2м} = 20,1 \text{ ГПа}$, $\mu_{12} = 0,262$.

Модули упругости E_θ , E_ψ (рис. 2.8 – 2.12) для углепластика и стеклопластика определены в разных диапазонах изменения соотношений k в зависимости от технологической схемы намотки тороидальной оболочки: для продольно-поперечной намотки – $0 \leq k \leq 0,5$, спирально-геодезической – $0 \leq k \leq 0,45$, равновесной спиральной намотки $0 \leq k \leq 0,25$ [57, 136 – 138]. Выбор таких пределов изменения параметра k , характеризующего геометрию тороидальной оболочки, обусловлен особенностями изготовления данных оболочек методом намотки волокном и конструктивно-технологическими ограничениями, такими как: предельные углы намотки, при превышении которых нити перестают касаться поверхности оправки на ее внутренней стороне ($90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$), и допустимые углы трения при намотке [57]. Это обеспечивает соответствие расчетной схемы и реального технологического процесса изготовления прочного тороидального корпуса.

На рис. 2.8 – 2.11 [137, 138] построены поверхности, иллюстрирующие распределение эффективных упругих постоянных E_θ , E_ψ вдоль линий главных кривизн тороидальной оболочки при продольно-поперечной намотке в зависимости от количества слоев, укладываемых в двух взаимно перпендикулярных направлениях с учетом переменной толщины вдоль меридиана.

Анализ E_θ , E_ψ для тороидальной оболочки, полученной продольно-поперечной намоткой, с варьированием количества монослоев в продольном и поперечном направлениях, что фиксировалось с помощью параметра δ (см. рис. 2.10), проводился на примере корпуса с $k = 0,25$. Параметр δ

показывает, во сколько раз с общей толщине стенки композиционного материала поперечных монослоев больше продольных – $\delta = \frac{l_1 + l_2}{l_1}$.

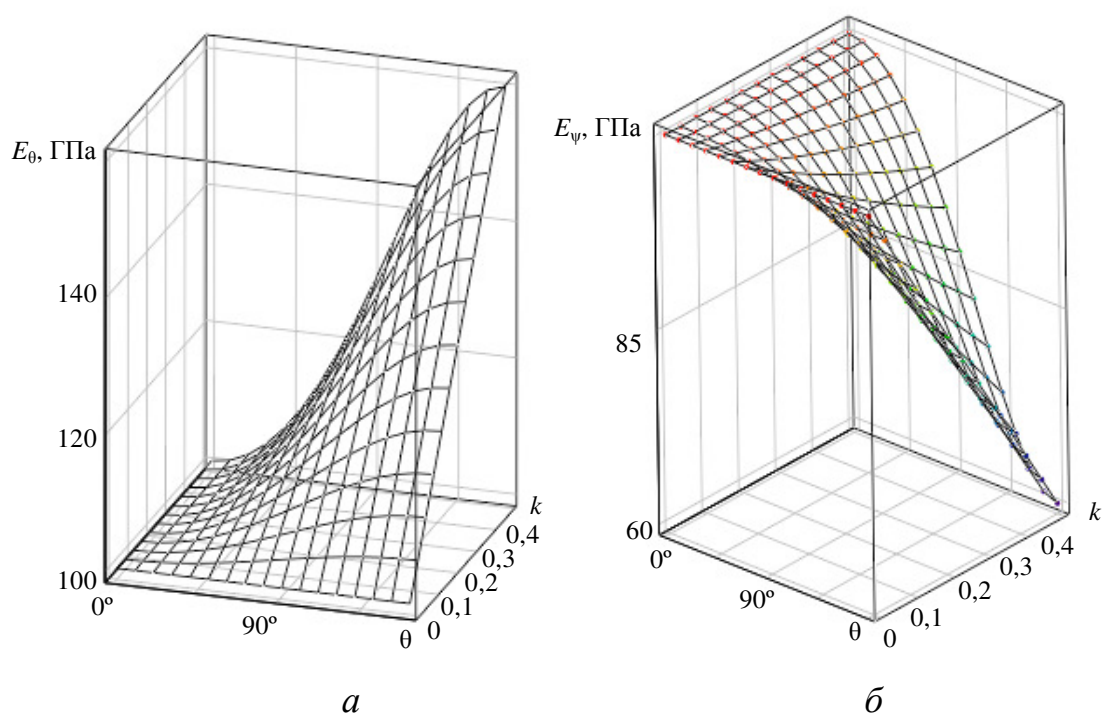


Рисунок 2.8 – Зависимость модуля упругости E_θ (*a*) и E_ψ (*б*) УП М35J/ ЭДТ-10, изготовленного продольно-поперечной намоткой волокон, от параметра k вдоль меридиана и угла θ при $\delta = 1$

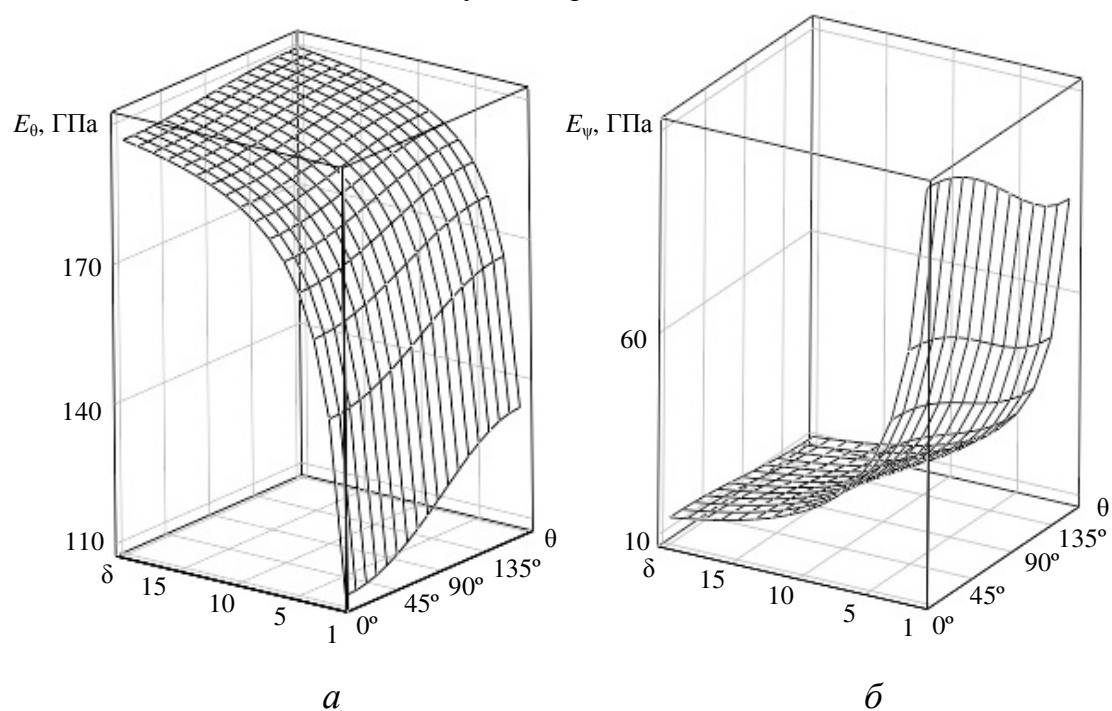


Рисунок 2.9 – Зависимость модуля упругости E_θ (*a*) и E_ψ (*б*) УП М35J/ ЭДТ-10, изготовленного продольно-поперечной намоткой волокон, от параметра δ и угла θ для корпуса с $k = 0,25$

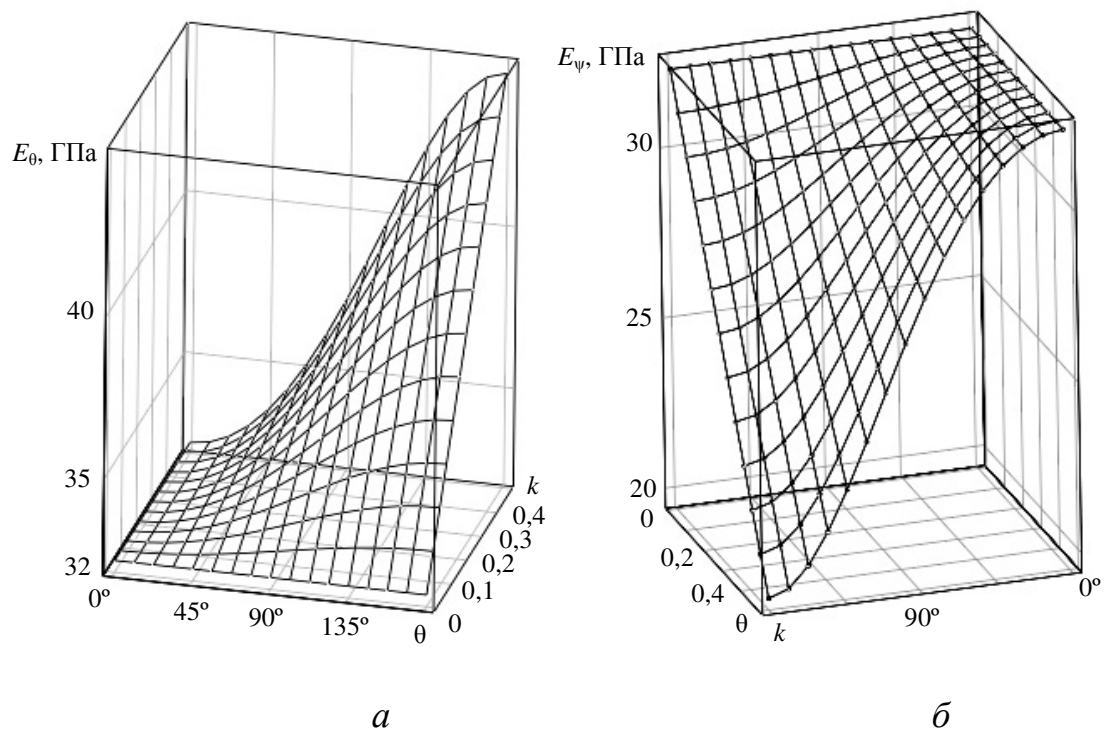


Рисунок 2.10 – Зависимость модуля упругости E_θ (а) и E_ψ (б) СП ВМПС/ ЭДТ-10, изготовленного продольно-поперечной намоткой волокон, от параметра k вдоль меридиана (угла θ) при $\delta = 1$

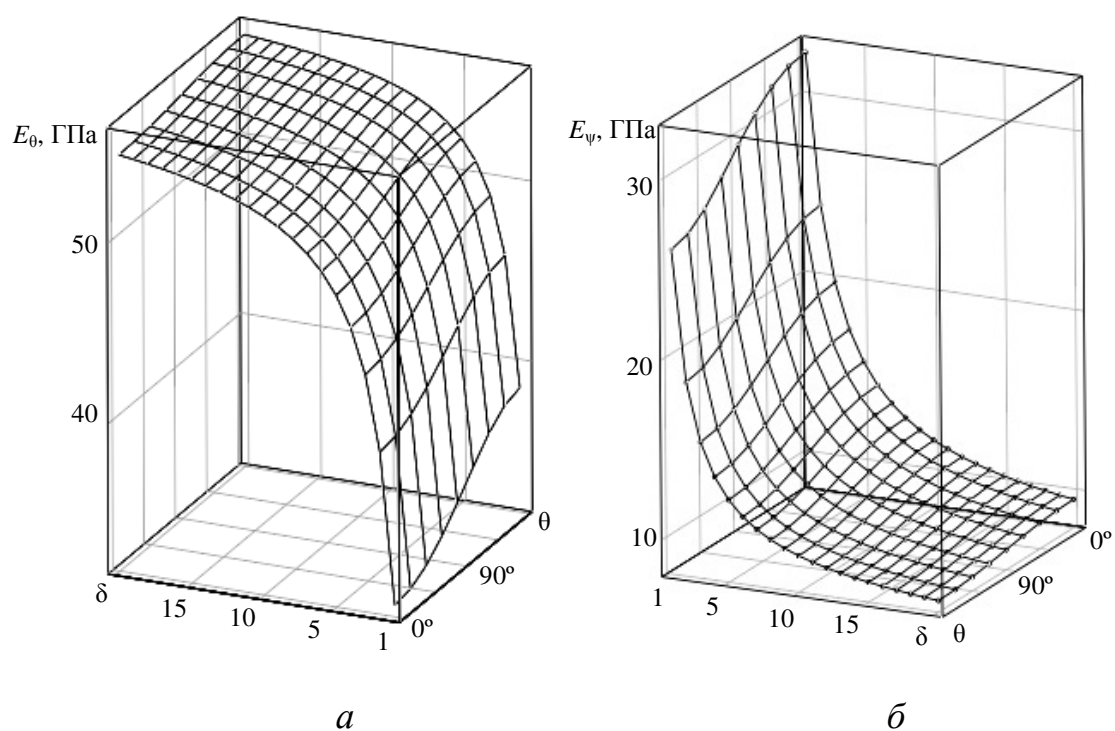


Рисунок 2.11 – Зависимость модуля упругости E_θ (а) и E_ψ (б) СП ВМПС/ЭДТ-10, изготовленного продольно-поперечной намоткой волокон, от параметра δ и угла θ для корпуса с $k = 0,25$

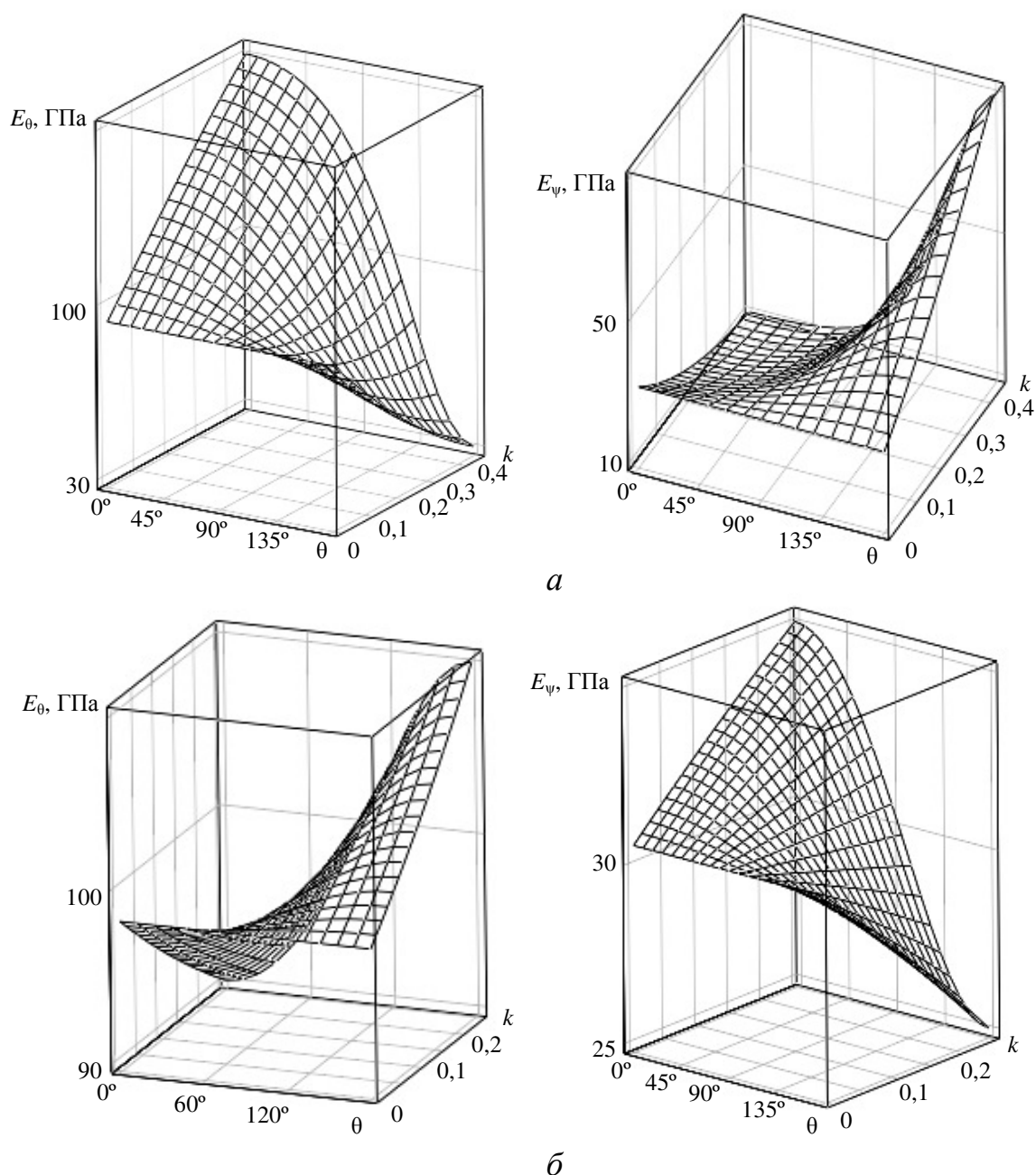


Рисунок 2.12 – Зависимость модулей упругости E_θ , E_ψ УП М35J/ ЭДТ-10, изготовленного перекрестной спиральной геодезической (а) и равновесной (б) намотками волокон, от геометрического параметра k и угла θ

Наиболее стабильно высокие модули упругости в направлении меридиана E_θ и параллели E_ψ получены при продольно-поперечной намотке тороидальной оболочки при увеличении числа монослоев поперечного направления до 5 раз ($\delta \leq 5$) по сравнению с продольным направлением (см. рис. 2.9, 2.11). С увеличением параметра k и приближении к внутреннему экватору тороидальной оболочки модуль упругости E_θ увеличивается за счет увеличения толщины в этой зоне, а E_ψ , наоборот, убывает, поскольку доля продольных

слоев в общей толщине стенки оболочки уменьшается в общей толщине стенки композиционного материала.

Рассчитанные упругие свойства E_θ , E_ψ стеклопластика и углепластика с продольно-поперечной схемой намотки с $\delta = 2$ очень отличаются между собой, хотя поверхности распределения свойств по меридиану тороидальной оболочки идентичны. Модули упругости E_θ , E_ψ стеклопластика при $\delta = 2$ почти одинаковы, поскольку стекловолокно изотропно в продольном и поперечном направлениях. В углепластике со схемой намотки $\delta = 2$ E_ψ составляет приблизительно 50% от E_θ , поскольку для однонаправленного волокнистого материала (монослоя) соотношение модулей упругости $E_{1м}/E_{2м}$ около 20.

Для оболочек, изготовленных перекрестной спиральной намоткой, траектория укладки нитей – геодезическая или равновесная – влияет на диапазон изменения упругих характеристик, и это надо учитывать при выборе технологической схемы намотки с учетом условий нагружения тороидальной оболочки.

При увеличении модуля упругости и объемной доли волокон увеличиваются и упругие характеристики многослойной тороидальной оболочки (рис. 2.8, 2.10).

На рис. 2.13 и 2.14 показаны зависимости отношения модулей упругости E_θ/E_ψ УП М35J/ЭДТ-10 (а) и СП ВМПС/ЭДТ-10 (б), полученных продольно-поперечной $[0^\circ_1; 90^\circ_1]_s$ и спиральной геодезической намоткой, от $0 \leq k \leq 0,45$ в области $\theta = 90^\circ$ и на внешнем ($\theta = 180^\circ$) и внутреннем ($\theta = 0^\circ$) экваторах тороидального корпуса.

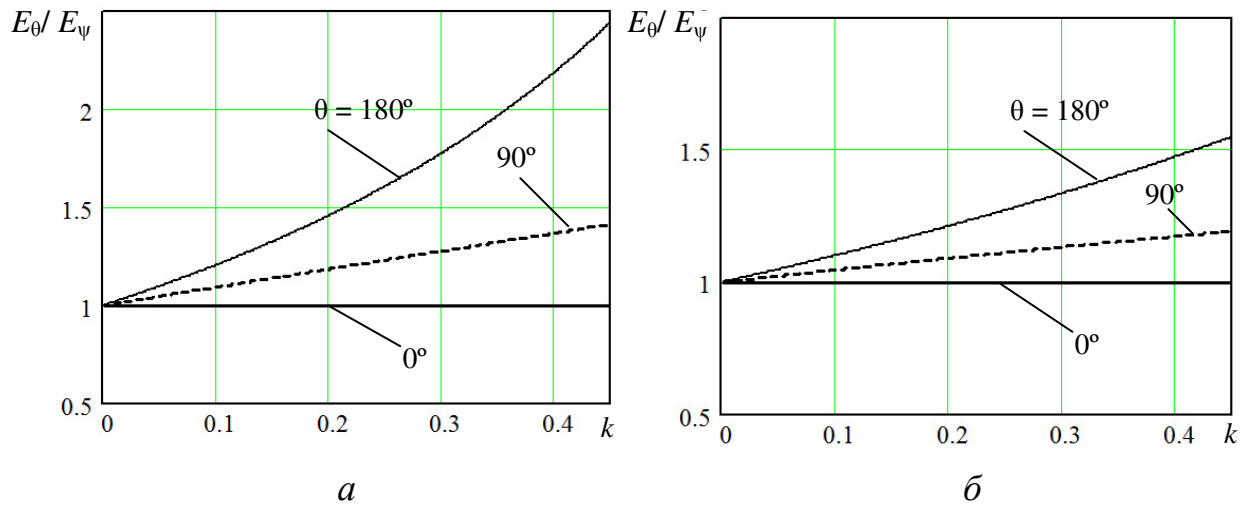


Рисунок 2.13 – Зависимость отношения модулей упругости E_θ/E_ψ УП М35J/ ЭДТ-10 (а) и СП ВМПС/ ЭДТ-10 (б), полученных продольно-поперечной намоткой, от $0 \leq k \leq 0,45$ в области $\theta = 90^\circ$ и на внешнем ($\theta = 180^\circ$) и внутреннем ($\theta = 0^\circ$) экваторах тороидального корпуса при $\delta = 1$

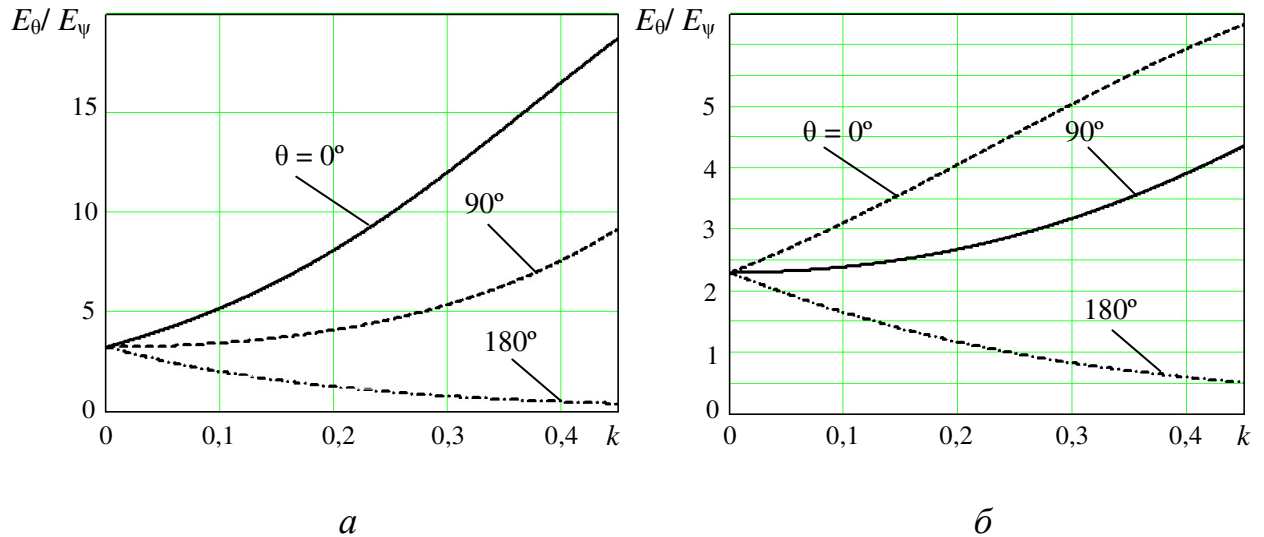


Рисунок 2.14 – Зависимость отношения модулей упругости E_θ/E_ψ УП М35J/ ЭДТ-10 (а) и СП ВМПС/ ЭДТ-10 (б), полученных спиральной геодезической намоткой, от $0 \leq k \leq 0,45$ в области $\theta = 90^\circ$ и на внешнем ($\theta = 180^\circ$) и внутреннем ($\theta = 0^\circ$) экваторах тороидального корпуса

Проведенный численный анализ позволил определить диапазон и интенсивность изменения упругих характеристик намотанных тороидальных оболочек с переменной толщиной стенки, которые необходимо учитывать при решении задач устойчивости и напряженно-деформированного состояния намотанных тороидов.

2.4 Выводы по разделу

1. Базируясь на результатах анализа теоретических и экспериментальных исследований в области проектирования тороидальных сосудов давления методом намотки из ПКМ и используя положения дискретно-структурной теории слоистых оболочек из ПКМ, построены расчетные модели распределения эффективных упругих постоянных намотанной замкнутой круговой тороидальной оболочки вдоль линий главных кривизн криволинейной поверхности оболочки.

2. Проведен анализ распределения упругих свойств замкнутых круговых тороидальных оболочек, изготовленных спиральной и продольно-поперечной намоткой из эпоксигугле- и стеклопластиков. Результаты теоретического анализа по построенным расчетным моделям представлены в виде графиков зависимости эффективных упругих постоянных от схемы намотки, геометрии кругового тороида и угла в плоскости меридиана.

Результаты данного раздела опубликованы в работах [136 – 138].

РАЗДЕЛ 3

УСТОЙЧИВОСТЬ ТОРОИДАЛЬНОГО ПРОЧНОГО КОРПУСА,
ВЫПОЛНЕННОГО НАМОТКОЙ, ПРИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ

3.1 Подходы и особенности расчета намотанных тонкостенных композитных конструкций

Особенность, возникающая при проектировании конструкций из ПКМ, связана с тем, что свойства композиционного материала зависят от многочисленных сочетаний структурных параметров, и это усложняет методы расчета несущей способности композитных конструкций. То есть существует необходимость в разработке соответствующих методов расчета композитных оболочечных конструкций с целью оптимизации структуры слоистого материала, которые бы учитывали анизотропные и другие свойства композиционных материалов и позволяли бы в итоге создать прочные конструкции минимальной массы. Очевидно, что первостепенным здесь является расчет конструкции при ограничении по устойчивости.

Первые проведенные исследования в области оптимального проектирования конструкций из композитов относились к оболочкам вращения, рассчитанных на внутреннее давление (камеры сгорания ракетных двигателей твердого топлива, баки, баллоны давления – сферические, цилиндрические, тороидальные и других форм). [126]

При расчете тонкостенных конструкций из композиционных материалов их деформирование описывается теориями многослойных оболочек, которые описаны в фундаментальных работах Э. Л. Аксельрада, Н. А. Алфутова [122], В.В. Болотина [125], Г. А. Ванина [123], В. З. Власова, А. Л. Гольденвейзера, Э. И. Григолюка, А. А. Ильюшина, В. И. Королева, Х. М. Муштари, В. В. Новожилова, И. Ф. Образцова, Ю. Н. Работнова, Ю. В. Немировского, Ю. М. Тарнопольского [124], С. Г. Лехницкого [139], С. А. Амбарцумяна [140], В. В. Васильева [118, 141] и других. Особенности нагружения, конструкции,

структуры и свойств композиционного материала определяют выбор соответствующего варианта теории. К работам, учитывающим специфику строения оболочек, образованных методом намотки, относятся труды А.Н. Елпатьевского, В.В. Васильева, И. Ф. Образцова, В.А. Бунакова, Э.В. Рамана, С.Б. Черевацкого.

Особенность композитной конструкции, выполненной намоткой, как объекта оптимизации состоит в следующем. Во-первых, при изготовлении конструкции методом намотки приобретаются не только анизотропные, но также и неоднородные свойства. Однако во многих существующих методах расчета оболочек последнее обстоятельство не учитывается. Во-вторых, многослойные КМ состоят из слоев постоянной или переменной толщины, что определяет дискретность при моделировании ряда задач оптимизации структуры слоистого материала.

В настоящее время основа алгоритма расчета на устойчивость композитных конструкций как аналитическими, так и численными методами состоит в том, что уравнения устойчивости строятся на следующих структурных уровнях: 1) монослой (армирующий материал – связующее); 2) конструкция (монослой – пакет монослоёв (слоистый материал).

Отсутствие решения задачи устойчивости намотанной тороидальной оболочки как прочного корпуса подводных технических средств, в которой были бы учтены особенности структуры ПКМ, обусловленные технологией формования, делает эту задачу актуальной.

3.2 Выбор основного критерия устойчивости тороидального прочного корпуса

Теоретические методы исследования несущей способности оболочек условно делятся на две группы: аналитические и численные. Сегодня проверка нагруженной конструкции на устойчивость или прочность при помощи одного из численных методов или с помощью прикладных программ, их реализующих,

является инженерной задачей. Аналитические решения позволяют в дальнейшем корректно ставить задачи численного моделирования и анализировать результаты.

Проектирование подводных аппаратов и лодок базируется на современной теории корабля, строительной механике и других судостроительных дисциплинах. Большое научное и практическое значение в этих областях имеют работы Сулова В. П., Кочанова Ю. П., Козлякова В. В., Бурдуна Е. Т., Григолюка Е. И., Кравцова В. И., Зайцева В. В., Коробанова Ю. Н., Панфилова Н. А., Вольмира А. С., Коростылева Л. И., Архангородского А. Г., Шостака В. П., Кржечковского П. Г., Магулы В. Е. и других. Строительная механика подводных лодок базируется на достижениях теории тонких оболочек как одного из основных разделов теории упругости [38].

Количество теоретических и экспериментальных работ по проблемам устойчивости судовых оболочек вращения за последние годы выросло значительно. Согласно [142]: «Работы в этом направлении позволяют по-новому взглянуть на понятия: устойчивость «в большом», устойчивость «в малом» и на соответствующие им «нижнюю» и «верхнюю» критические нагрузки». «Ранее считалось, что в качестве основного критерия устойчивости необходимо выбирать «нижнюю» критическую нагрузку, т.е. исследовать устойчивость «в большом», что давало критические нагрузки, лежащие ниже нижней границы результатов эксперимента [142] ». Согласно доклада В.И. Феодосьева [143]: «Становится совершенно ясным, что основная концепция устойчивости в большом неверна. Неверна в том смысле, что переход к новому состоянию и существование нового состояния - понятия нетождественные, и в практических расчетах оболочек и вообще, по-видимому, всех тонкостенных конструкций ориентироваться на нижнюю критическую нагрузку нельзя. Необходимо определять нагрузку выпучивания, то есть ту, при которой реализуется интересующий нас переход к новому состоянию. На эту нагрузку и следует ориентироваться при расчете [143]».

Как утверждает автор в работе [142]: «...такой же концепции придерживается большинство специалистов по строительной механике корабля, занимающихся устойчивостью судовых оболочек». В качестве основной характеристики устойчивости судовых круговых цилиндрических оболочек, находящихся под действием внешнего равномерного давления, принимается верхняя критическая нагрузка.

Поэтому до сих пор актуален расчет слоистых анизотропных конструкций в линейной постановке, когда максимальные прогибы пластины или оболочки не превышают половины ее толщины.

В работе в качестве основной расчетной характеристики устойчивости выбрана верхняя критическая нагрузка, то есть потеря устойчивости замкнутой ортотропной тороидальной оболочки переменной толщины (см. рис. 1.16) под действием равномерно распределенного внешнего давления рассматривается в малом по осесимметричной форме, предполагая начальное напряженное состояние тороидальной оболочки безмоментным.

Аналитическое решение позволит определять величину верхнего критического давления и форму потери устойчивости в зависимости от схемы намотки, типа армирующего материала и связующего, коэффициента заполнения объема КМ, количества монослоев, учитывая конструктивно-технологические особенности при производстве замкнутой тороидальной оболочки кругового поперечного сечения и возникающую при намотке разнотолщинность и разнородность вдоль поперечного сечения.

3.3 Общая методика расчета верхнего критического давления потери устойчивости при гидростатическом сжатии тороидального прочного корпуса, выполненного намоткой из ПКМ

На основании теории расчета тонкостенных оболочек сформулирована задача устойчивости намотанного тороидального ПК (рис. 3.1), находящегося при гидростатическом сжатии, как слоистой ортотропной замкнутой

тороидальной оболочки кругового поперечного сечения с монослоями переменной и осредненной постоянной толщины. Такая постановка задачи в дискретной постановке впервые учитывает технологические возможности реализации различных схем армирования и возникающее при намотке тороидальных оболочек неравномерное распределение толщины стенки вдоль меридиана.

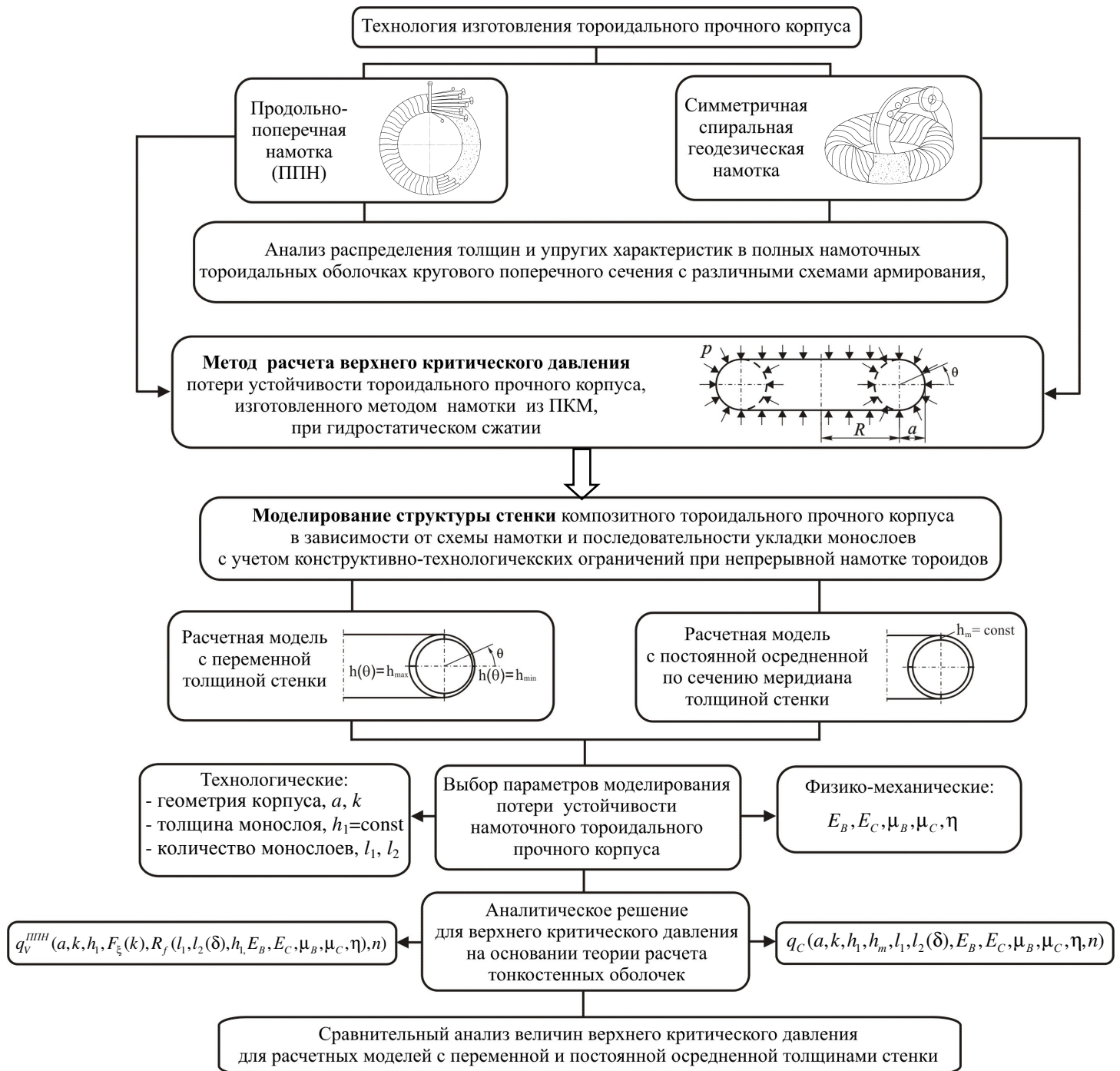


Рисунок 3.1 – Методика расчета верхнего критического давления потери устойчивости при гидростатическом сжатии тороидального прочного корпуса, получаемого методом намотки из однонаправленных ПКМ

3.3.1 Теоретические зависимости, описывающие устойчивость намотанной ортотропной тороидальной оболочки, находящейся под действием равномерного внешнего давления

Рассматривается круговая полная тороидальная оболочка переменной толщины, находящаяся под действием внешнего равномерного давления.

Уравнения устойчивости для случая осесимметричной задачи ортотропной тороидальной оболочки имеют вид [140] :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(AT_2)}{\partial\theta} - \frac{\partial A}{\partial\theta} T_1 + k_2 \cdot \left(\frac{\partial(AM_2)}{\partial\theta} - \frac{\partial A}{\partial\theta} \cdot M_1 \right) &= 0; \\ - (k_1 T_1 + k_2 T_2) + \frac{1}{B} \cdot \left(\frac{\partial^2(AM_2)}{\partial\theta^2} - \frac{\partial^2 A}{\partial\theta^2} \cdot M_1 - \frac{\partial A}{\partial\theta} \cdot \frac{\partial M_1}{\partial\theta} \right) &= q_z, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где $A = \frac{a}{k}(1 + k \cos\theta)$ и $B = a$ – коэффициенты Ламе для тороидальной поверхности;

k_1, k_2 – главные кривизны [140].

В формулах (3.1) и последующих индексы 1 и 2 соответствуют двум криволинейным координатам ψ и θ (см. рис. 2.2).

Выражение для поперечной силы N_2 [91]:

$$N_2 = \frac{1}{A \cdot B} \cdot \left(\frac{\partial(A \cdot M_2)}{\partial\theta} - \frac{\partial A}{\partial\theta} \cdot M_1 \right). \quad (3.2)$$

Геометрические соотношения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{k \cos\theta}{a(1 + k \cos\theta)} v - \frac{k \sin\theta}{a(1 + k \cos\theta)} \omega; \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial v}{\partial\theta} + \frac{1}{a} \omega; \\ \chi_1 &= -\frac{k \sin\theta}{a^2(1 + k \cos\theta)} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial\theta}; \quad \chi_2 = -\frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial\theta^2}, \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

где $v(\theta)$ – тангенциальное перемещение срединной поверхности оболочки вдоль угловой координаты θ ;

$\omega(\theta)$ – радиальное перемещение по радиусу меридионального сечения тора [140].

Докритическому напряженному состоянию соответствуют усилия [91]:

$$T_1 = -\frac{qa}{2}, \quad T_2 = -\frac{1 + \frac{k}{2} \cos \theta}{1 + k \cos \theta} \cdot qa,$$

что соответствует фиктивной поверхностной нагрузке q_z [90]:

$$q_z = -T_1 \chi_1 - T_2 \chi_2 = \frac{q}{a(1 + k \cos \theta)} \cdot \left(\frac{1}{2} k \sin \theta \frac{\partial \omega}{\partial \theta} + \left(1 + \frac{k}{2} \cos \theta \right) \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2} \right). \quad (3.4)$$

Выражения усилий и моментов:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= C_{11} \cdot \varepsilon_1 + C_{12} \cdot \varepsilon_2; \quad T_2 = C_{22} \cdot \varepsilon_2 + C_{12} \cdot \varepsilon_1; \\ M_1 &= D_{11} \cdot \chi_1 + D_{12} \cdot \chi_2; \quad M_2 = D_{22} \cdot \chi_2 + D_{12} \cdot \chi_1, \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

где C_{ij} , D_{ij} – жесткости композитной оболочки [140].

Подставляя значения компонент деформаций из (3.3) в (3.5), а затем полученные выражения для внутренних сил и моментов и выражения (3.5), (3.4), (3.2) в (3.1), учитывая, что жесткости C_{ij} и D_{ij} функции от θ для расчета оболочки переменной толщины, получим дифференциальные уравнения устойчивости в перемещениях для замкнутой ортотропной тороидальной оболочки переменной толщины, содержащие как частный случай уравнения для изотропной оболочки постоянной толщины, полученные Т. И. Кошелевой [91], и для ортотропной оболочки постоянной толщины:

$$\left. \begin{aligned} L_{11}(C_{ij} C'_{ij}) \omega + L_{12}(C_{ij} C'_{ij} D_{ij} D'_{ij}) \omega &= 0; \\ L_{21}(C_{ij}) \omega + L_{22}(C_{ij} D_{ij} D'_{ij}) \omega &= q_z, \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

где линейные операторы L_{ij} имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} L_{11}(C_{ij} C'_{ij}) &= (C_{12} - C_{11}) \frac{k \sin^2 \theta}{1 + k \cos \theta} - C_{22} \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} - C'_{12} \sin \theta - C_{12} \frac{\cos \theta + k}{1 + k \cos \theta} + C'_{22} \frac{1 + k \cos \theta}{k} \frac{\partial}{\partial \theta} + \\ &+ C_{22} \cdot \frac{1 + k \cos \theta}{k} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \\ L_{12}(C_{ij} C'_{ij} D_{ij} D'_{ij}) &= (C_{11} - C_{12}) \frac{k \sin \theta \cos \theta}{1 + k \cos \theta} + (C_{12} - C_{22}) \sin \theta + C_{12} \cos \theta \frac{\partial}{\partial \theta} + C'_{22} \frac{1 + k \cos \theta}{k} + \\ &+ C'_{12} \cos \theta + C_{22} \frac{1 + k \cos \theta}{k} \frac{\partial}{\partial \theta} + (D_{11} - D_{12}) \frac{k \sin^2 \theta}{a^2 (1 + k \cos \theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} + D_{22} \frac{\sin \theta}{a^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + D'_{12} \frac{\sin \theta}{a^2} \frac{\partial}{\partial \theta} + \\ &+ D_{12} \frac{k + \cos \theta}{a^2 (1 + k \cos \theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} - D'_{22} \frac{1 + k \cos \theta}{ka^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - D_{22} \frac{1 + k \cos \theta}{ka^2} \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_{21}(C_{ij}) &= C_{11} \frac{k^2 \sin \theta \cos \theta}{1 + k \cos \theta} - C_{12} k \cos \theta \frac{\partial}{\partial \theta} + C_{12} k \sin \theta - C_{22} (1 + k \cos \theta) \frac{\partial}{\partial \theta} \\
L_{22}(C_{ij} D_{ij} D'_{ij}) &= -C_{11} \frac{k^2 \cos^2 \theta}{1 + k \cos \theta} - 2C_{12} k \cos \theta - C_{22} (1 + k \cos \theta) + (D_{11} - D_{12}) \frac{k^2 \sin \theta \cos \theta}{a^2 (1 + k \cos \theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} - \\
&- (D_{12} - D_{22}) \frac{k \cos \theta}{a^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + D_{12} \frac{k(\sin \theta (2k^2 - 1) + k \sin \theta \cos \theta)}{a^2 (1 + k \cos \theta)^2} \frac{\partial}{\partial \theta} + 2D_{12} \frac{k(\cos \theta + k)}{a^2 (1 + k \cos \theta)} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \\
&+ 2D'_{12} \frac{k(\cos \theta + k)}{a^2 (1 + k \cos \theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} + (D'_{12} + 2D'_{22}) \frac{k \sin \theta}{a^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + (D'_{11} - 2D'_{12}) \frac{k^2 \sin^2 \theta}{a^2 (1 + k \cos \theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} - \\
&- 2D'_{22} \frac{1 + k \cos \theta}{a^2} \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} - D_{22} \frac{1 + k \cos \theta}{a^2} \frac{\partial^4}{\partial \theta^4} - D'_{22} \frac{1 + k \cos \theta}{a^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + 2D_{22} \frac{k \sin \theta}{a^2} \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} + \\
&+ (D_{11} - 2D_{12}) \frac{k^2 \sin^2 \theta}{a^2 (1 + k \cos \theta)} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + D'_{12} \frac{k \sin \theta}{a^2} \frac{\partial}{\partial \theta} + (D_{11} - 2D_{12}) \frac{k^2 \sin \theta (\cos \theta + k)}{a^2 (1 + k \cos \theta)} \frac{\partial}{\partial \theta}
\end{aligned}$$

Для замкнутой в обоих направлениях круговой тороидальной оболочки решение должно удовлетворять периодичности относительно угла θ . Решение будем искать в виде [91]:

$$v(\theta) = F \cdot \sin n\theta ; \quad \omega(\theta) = C \cdot \cos n\theta .$$

Интегрированием уравнений устойчивости (3.6) по методу Бубнова-Галеркина, принимая во внимание, что элемент площади тора равен $ABd\theta d\psi = [a^2(1+k \cdot \cos \theta)/k]d\theta d\psi$, получаем систему алгебраических уравнений относительно L и M :

$$\begin{aligned}
L \cdot b_{11} - M \cdot n \cdot b_{12} &= 0 ; \\
-L \cdot n \cdot b_{21} + M \cdot [b_{22}^{(1)} - q \cdot b_{22}^{(2)}] &= 0 .
\end{aligned}$$

В такой постановке задачи раскрытием характеристического определителя можно получить формулы для верхней критической нагрузки q при осесимметричной форме потери устойчивости тороидальной ортотропной оболочки как для постоянной так и переменной толщины:

$$q = \frac{1}{b_{22}^{(2)} b} \cdot \left[b_{22}^{(1)} - n^2 \cdot \frac{b_{21} \cdot b_{12}}{b_{11}} \right] .$$

Число полуволн потери устойчивости по меридиану n вычисляется последовательно для $n = 2, 3 \dots$ до получения минимума верхнего критического давления q для тороидального прочного корпуса.

3.3.2 Верхнее критическое давление для тороидального прочного корпуса, полученного продольно-поперечной намоткой, с учетом переменности толщины по меридиану

Выражения для жесткостей C_{ij} , D_{ij} должны обеспечивать соответствие реального технологического процесса изготовления намотанного тороидального корпуса и расчетной модели композиционного материала.

Порядок чередования слоёв в пакете многослойного материала при расчете на устойчивость должен учитываться при подсчёте его жесткостей.[141] Суммирование должно производиться по всем монослоям, входящим в элемент.

При изготовлении тороидального прочного корпуса продольно-поперечной намоткой жесткости C_{ij} , D_{ij} будут переменными величинами, функциями координаты θ , и определяются по формулам, которые описывают дискретную расчетную модель структуры стенки композиционного материала переменной толщины (см. рис. 2.6):

$$C_{11}(\theta) = B_1 l_1 h_1 + B_2 (l_1 + l_2) h_2(\theta); C_{22}(\theta) = B_2 l_1 h_1 + B_1 (l_1 + l_2) h_2(\theta);$$

$$C_{12}(\theta) = B_{12} (l_1 h_1 + (l_1 + l_2) h_2(\theta));$$

$$\begin{aligned} D_{11}(\theta) = & \frac{1}{3} \sum_{s=1}^{l_1} \left[B_{11} \left[(s(h_1 + h_2(\theta)) - h_2(\theta))^3 - (s-1)^3 (h_1 + h_2(\theta))^3 \right] + \right. \\ & + B_{22} \left[(h_1 + h_2(\theta))^3 s^3 - (s(h_1 + h_2) - h_2(\theta))^3 \right] + \\ & + \frac{1}{3} B_{22} \sum_{x=1}^{l_2} \left[(l_1(h_1 + h_2(\theta)) + x h_2(\theta))^3 - (l_1(h_1 + h_2(\theta)) + (x-1) h_2(\theta))^3 \right] - \\ & - \frac{1}{2} [h_2(\theta)(l_1 + l_2) + l_1 h_1] \cdot [l_1 h_1 h_2(\theta)(B_{22} - B_{11})(1 + l_2) + \frac{1}{2} [h_2(\theta)(l_1 + l_2) + l_1 h_1] \times \\ & \times [B_{22} h_2(\theta)(l_1 + l_2) + B_{11} l_1 h_1]] \\ D_{22}(\theta) = & \frac{1}{3} \sum_{s=1}^{l_1} \left[B_{22} \left[(s(h_1 + h_2(\theta)) - h_2(\theta))^3 - (s-1)^3 (h_1 + h_2(\theta))^3 \right] + \right. \\ & + B_{11} \left[(h_1 + h_2(\theta))^3 s^3 - (s(h_1 + h_2) - h_2(\theta))^3 \right] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{3} B_{11} \sum_{x=1}^{l_2} \left[(l_1(h_1 + h_2(\theta)) + x h_2(\theta))^3 - (l_1(h_1 + h_2(\theta)) + (x-1)h_2(\theta))^3 \right] - \\
& - \frac{1}{2} [h_2(\theta)(l_1 + l_2) + l_1 h_1] \cdot [l_1 h_1 h_2(\theta)(B_{11} - B_{22})(1 + l_2) + \frac{1}{2} [h_2(\theta)(l_1 + l_2) + l_1 h_1] \times \\
& \times [B_{11} h_2(\theta)(l_1 + l_2) + B_{22} l_1 h_1]] \\
D_{12}(\theta) &= \frac{1}{3} B_{12} \sum_{s=1}^{l_1} \left[s^3 (h_1 + h_2(\theta))^3 - (s-1)^3 (h_1 + h_2(\theta))^3 \right] + \\
& + \frac{1}{3} B_{12} \sum_{x=1}^{l_2} \left[(l_1(h_1 + h_2(\theta)) + x h_2(\theta))^3 - (l_1(h_1 + h_2(\theta)) + (x-1)h_2(\theta))^3 \right] - \frac{1}{4} B_{12} [h_2(\theta)(l_1 + l_2) + l_1 h_1]^3 \\
B_{11} &= \frac{E_{1M}}{1 - \mu_1 \cdot \mu_2}; B_{22} = \frac{E_{2M}}{1 - \mu_1 \cdot \mu_2}; B_{12} = \frac{E_{2M} \cdot \mu_1}{1 - \mu_1 \cdot \mu_2} = \frac{E_{1M} \cdot \mu_2}{1 - \mu_1 \cdot \mu_2},
\end{aligned}$$

где $h_2(\theta) = h_{\Pi}(\theta, k)$ – толщина поперечного монослоя в пакете;

$h_{\Sigma}(\theta, k, l_1, l_2)$ – общая толщина стенки оболочки [136].

После преобразований жесткости C_{ij} , D_{ij} имеют вид:

$$\left. \begin{aligned}
D_{11}(\theta) &= R_1 h_2^2(\theta) + R_2 h_2(\theta) + R_3 h_2^3(\theta) + R_4; \quad C_{11}(\theta) = R_{13} + R_{14} h_2(\theta); \\
D_{22}(\theta) &= R_5 h_2^2(\theta) + R_6 h_2(\theta) + R_7 h_2^3(\theta) + R_8; \quad C_{22}(\theta) = R_{15} + R_{16} h_2(\theta); \\
D_{12}(\theta) &= R_9 h_2^3(\theta) + R_{10} h_2^2(\theta) + R_{11} h_2(\theta) + R_{12}; \quad C_{12}(\theta) = R_{17} + R_{18} h_2(\theta),
\end{aligned} \right\} (3.7)$$

где R_f – функции, зависящие от параметров, характеризующих структуру намотанной тороидальной оболочки, и свойств монослоя (армирующей ленты) ($f = 1, 2 \dots 18$):

$$\begin{aligned}
R_1 &= \frac{1}{12} h_1 l_1 [B_{11} (l_1^2 + 3l_2^2) + 2l_1 B_{22} (l_1 + 3l_2) + 2(B_{11} - B_{22})(3l_2 + 1)]; \\
R_2 &= \frac{1}{12} h_1^2 l_1 [2 \cdot B_{11} l_1^2 + B_{22} l_1^2 + 3 \cdot l_2 l_1 B_{22} + 2(B_{22} - B_{11})]; \\
R_3 &= \frac{1}{12} B_{22} (l_2 + l_1)^3; \quad R_4 = \frac{1}{12} B_{11} h_1^3 l_1^3; \\
R_5 &= \frac{1}{12} h_1 l_1 [l_1^2 (2B_{11} + B_{22}) + 3 \cdot l_2 (2l_1 B_{11} + l_2 B_{22}) + 2(B_{22} - B_{11})(3l_2 + 1)]; \\
R_6 &= \frac{1}{12} h_1^2 l_1 [l_1^2 (B_{11} + 2B_{22}) + 3 \cdot B_{11} l_2 l_1 + 2(B_{11} - B_{22})]; \quad R_7 = \frac{1}{12} B_{11} (l_2 + l_1)^3; \\
R_8 &= \frac{1}{12} B_{22} h_1^3 l_1^3; \quad R_9 = \frac{1}{12} B_{12} (l_2 + l_1)^3; \quad R_{10} = \frac{3}{12} B_{12} (l_2 + l_1)^2 l_1 h_1; \\
R_{11} &= \frac{3}{12} B_{12} (l_2 + l_1) l_1^2 h_1^2; \quad R_{12} = \frac{1}{12} B_{12} h_1^3 l_1^3; \quad R_{13} = B_{11} l_1 h_1; \quad R_{14} = B_{22} (l_1 + l_2);
\end{aligned}$$

$$R_{15} = B_{22}l_1h_1; R_{16} = B_{11}(l_1 + l_2); R_{17} = B_{12}l_1h_1; R_{18} = B_{12}(l_1 + l_2).$$

Подставляя жесткости C_{ij} , D_{ij} (3.7) в уравнения устойчивости в перемещениях (3.6) для замкнутой ортотропной тороидальной оболочки, интегрируя которые затем методом Бубнова-Галеркина и раскрытием характеристического определителя, получено аналитическое решение $q_V^{\text{ППН}}$ (3.8) для верхнего критического давления потери устойчивости тороидального прочного корпуса, выполненного продольно-поперечной намоткой, с учетом переменности толщины поперечного монослоя $h_{\Pi}(\theta, k)$ (2.2):

$$\begin{aligned} q_V^{\text{ППН}} = & \frac{k^2}{an^2 \left(1 + \frac{k^2}{4}\right)} \left[\left(\frac{1}{2} R_{13} + R_{17} \right) + \left(\frac{1}{k^2} R_{16} + R_{14} F_2 \right) h_1 (1+k) + \frac{n^2}{a^2} \left[(R_{12} + R_4 + R_8) \frac{1}{2} + \right. \right. \\ & + (R_2 - R_{11}) h_1 (1+k) F_1 + (R_1 - 2(R_5 + R_{10})) h_1^2 (1+k)^2 F_2 + ((R_3 - 7R_9) F_3 + (R_9 - R_7) F_5) h_1^3 (1+k)^3 \Big] + \\ & + \left(\frac{1}{k^2} + \frac{1}{2} \right) R_{15} + \frac{n^4}{a^2 k^2} \left[R_7 h_1^3 (1+k)^3 F_4 + R_5 h_1^2 (1+k)^2 + R_6 h_1 (1+k) + R_8 \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) \right] - \\ & - n^2 \frac{\frac{1}{2} R_{17} + \frac{1}{k^2} \left[R_{15} \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) + R_{16} \cdot h_1 \cdot (1+k) \right]}{\left[\frac{1}{2} \cdot (R_{13} - 3R_{17}) + (R_{14} - 3R_{18}) \cdot h_1 \cdot (1+k) \cdot F_1 \right] + \frac{n^2}{k^2} \left[R_{15} \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) + R_{16} \cdot h_1 \cdot (1+k) \right]} \times \\ & \times \left[\frac{1}{k^2} \left[R_{15} \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) + R_{16} \cdot h_1 \cdot (1+k) \right] + \frac{1}{2a^2} \cdot (R_4 + R_{12}) + \frac{1}{a^2} (R_2 + R_{11}) h_1 (1+k) \cdot F_1 + \right. \\ & + \frac{1}{a^2} (R_1 + R_{10}) h_1^2 (1+k)^2 F_2 + \frac{1}{a^2} (R_3 + R_9) h_1^3 (1+k)^3 F_3 + \frac{1}{2} R_{17} + \\ & \left. \left. + \frac{n^2}{a^2 k^2} \left[R_8 \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) + R_6 h_1 (1+k) + R_5 h_1^2 (1+k)^2 + R_7 h_1^3 (1+k)^3 F_4 \right] \right] \right], \end{aligned} \quad (3.8)$$

где n – количество полуволин потери устойчивости в меридиальном направлении;

$F_{\xi}(k)$ – функции от ортогонализации разложения $h_{\Pi}(\theta, k)$ в биномиальный ряд при удержании 10 членов ($\xi = 1, 2 \dots 5$):

$$F_1 = \frac{1}{256} \cdot (128 + 32 \cdot k^2 + 16 \cdot k^4 + 10 \cdot k^6 + 7 \cdot k^8);$$

$$F_2 = \frac{1}{256} \cdot (128 + 96 \cdot k^2 + 80 \cdot k^4 + 70 \cdot k^6 + 63 \cdot k^8);$$

$$F_3 = \frac{1}{256} \cdot (128 + 192 \cdot k^2 + 240 \cdot k^4 + 280 \cdot k^6 + 315 \cdot k^8);$$

$$F_4 = \frac{1}{128} \cdot (128 + 64 \cdot k^2 + 48 \cdot k^4 + 40 \cdot k^6 + 35 \cdot k^8);$$

$$F_5 = \frac{1}{128} \cdot (128 + 192 \cdot k^2 + 240 \cdot k^4 + 560 \cdot k^6 + 315 \cdot k^8).$$

При получении решения $q_V^{ППП}$ закон изменения толщины вдоль меридиана для поперечных монослоев, как функция от θ , раскладывался в биномиальный ряд при удержании 10 членов для достижения точности решения, сходимость которого исследовалась численно:

$$h_2(\theta) = h_{II}(\theta, k) = h_1 \frac{1+k}{1+k \cdot \cos \theta} = h_1 (1+k) (1 - k \cos \theta + k^2 \cos^2 \theta - k^3 \cos^3 \theta + \dots). \quad (3.9)$$

Применение решения (3.8) ограничено областью $0 \leq k \leq 0,5$, поскольку формула (3.9) раскладывалась в биномиальный ряд в заданном интервале k , а также исходя из практического применения тороидальной оболочки в качестве прочного корпуса подводных технических средств.

Решение $q_V^{ППП}$ для верхнего критического давления не включает решение для изотропного и композитного тороидального корпуса с постоянной толщиной.

3.3.3 Верхнее критическое давление для композитного корпуса с постоянной толщиной

Схема представления данных о параметрах структуры многослойного ПКМ с заменой монослоев переменной толщины по меридиану на осредненные постоянной толщины показана на рис. 3.2. Далее в тексте толщина намотанной замкнутой тороидальной оболочки с такой структурой называется осредненной постоянной толщиной.

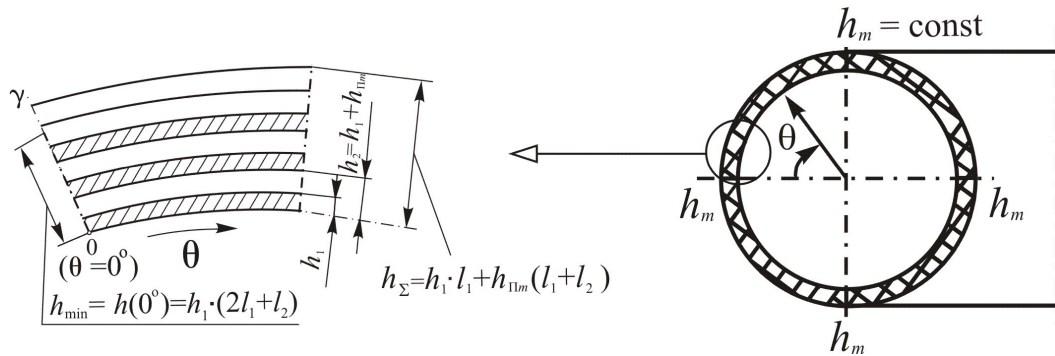


Рисунок 3.2 – Дискретная расчетная модель с постоянной осредненной по сечению меридиана толщиной стенки для корпуса, выполненного ППН и перекрестной спиральной намоткой

Для расчета корпуса, выполняемого перекрестной спиральной намоткой, в дискретной расчетной модели (см. рис. 3.2) принимается: $l_2 = 0$, $h_1 = h_{\Pi m}$ и толщины монослоев постоянными – $h_{SGm} = \text{const}$ или $h_{SRm} = \text{const}$.

Профили переменной и осредненной постоянной толщин для поперечных монослоев ППН и монослоев спиральной геодезической намотки изображены на рис. 3.3 и 3.4 соответственно.

Для армированных материалов, полученных спиральной перекрестной намоткой, в дискретной расчетной модели (см. рис. 3.2) l_2 взять равным 0. При расчете жесткостей C_{ij} , D_{ij} упругие характеристики i -монослоя в системе координат тороидальной оболочки θ, ψ при расположении армирующего материала под углом φ находятся на основании соотношений (2.7). Вместо переменных углов намотки $\varphi_G(\theta, k)$ или $\varphi_R(\theta, k)$ в выражениях (2.7) – постоянные осредненные по меридиальному сечению φ_{Gm} или φ_{Rm} соответственно для геодезической и равновесной намотки.

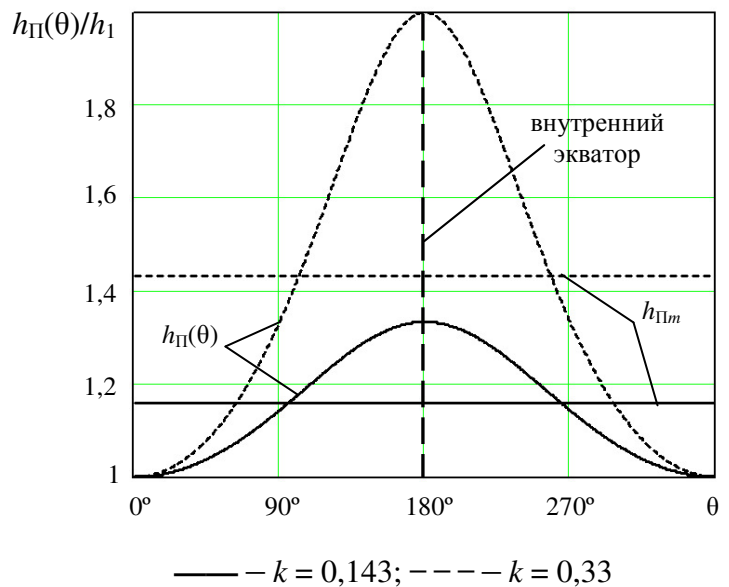


Рисунок 3.3 – Профили переменной и осредненной постоянной толщин поперечных монослоев

После подстановки в (3.6) жесткостей (3.7) C_{ij} , $D_{ij} = \text{const}$ с осредненными толщинами монослоев (вместо $h_2(\theta) - h_{\Pi m}$ или h_{Sm} соответственно для продольно-поперечной и перекрестной спиральной намотки) получим дифференциальные уравнения устойчивости в перемещениях для замкнутых ортотропных тороидальных оболочек постоянной толщины, полученные продольно-поперечной и перекрестной спиральной намотками. Полученные уравнения включают как частный случай уравнения для изотропной оболочки постоянной толщины, полученные Т.И. Кошелевой [91].

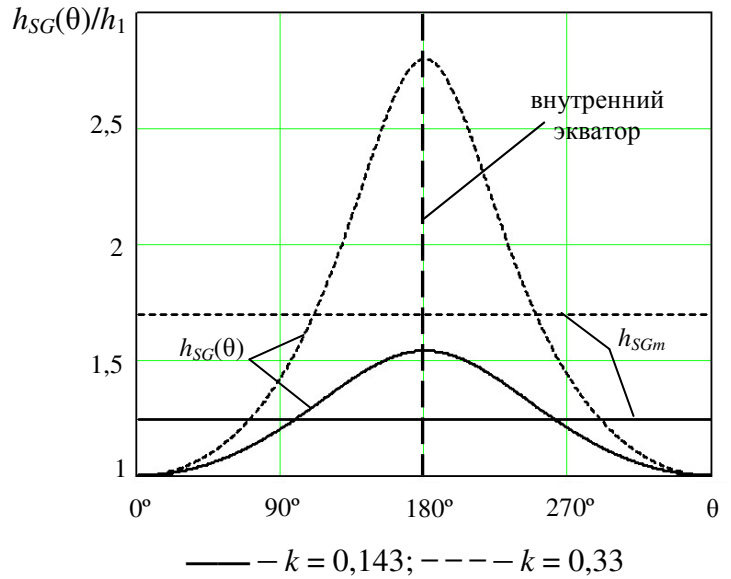


Рисунок 3.4 – Профили переменной и осредненной постоянной толщин монослоев спиральной геодезической намотки

После интегрирования системы дифференциальных уравнений методом Бубнова-Галеркина получено верхнее критическое давление q_C , для тороидального прочного корпуса, полученного продольно-поперечной или перекрестной спиральной намоткой на основе расчетной схемы с осредненной постоянной толщиной ($h_{\Pi m}$ и $h_{SGm} - \text{const}$):

$$\begin{aligned}
 q_C = & \frac{k^2}{an^2 \left(1 + \frac{k^2}{4}\right)} \left[C_{12} + C_{11} \frac{1}{2} + \frac{1}{k^2} C_{22} \left(1 + \frac{k^2}{2}\right) + \right. \\
 & + n^2 \left[(D_{11} + D_{22} + D_{12}) \frac{1}{2a^2} + n^2 D_{22} \frac{1}{k^2 a^2} \left(1 + \frac{k}{2}\right) \right] - \\
 & - n^2 \left[C_{12} \frac{1}{2} + C_{22} \frac{1}{k^2} \left(1 + \frac{k^2}{2}\right) + (D_{11} - D_{12}) \frac{1}{2a^2} + D_{12} \frac{1}{a^2} + \frac{n^2}{k^2 a^2} D_{22} \left(1 + \frac{k^2}{2}\right) \right] \times \\
 & \quad \left. (C_{12} + C_{11}) \frac{1}{2} + n^2 C_{22} \frac{1}{k^2} \left(1 + \frac{k^2}{2}\right) \right] \times \\
 & \times \left[(C_{12} + C_{22}) \frac{1}{2} + C_{22} \frac{1}{k^2} \right].
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

В результате получены следующие аналитические выражения для верхнего критического давления потери устойчивости: $q_C^{\text{ППН}}$ – для корпуса, выполненного ППН, на основе дискретной расчетной модели с осредненной постоянной толщиной; $q_V^{\text{ППН}}$ – для корпуса, выполненного ППН, на основе дискретной расчетной модели с переменной толщиной поперечных слоев; $q_C^{\text{СН}}$ – как частный случай решения $q_C^{\text{ППН}}$ для корпуса, выполненного перекрестной спиральной намоткой, на основе дискретной расчетной модели с осредненной постоянной толщиной.

Блок-схема расчета верхнего критического давления потери устойчивости при гидростатическом сжатии намотанного тороидального прочного корпуса представлена на рис. 3.5.

Решения $q_C^{\text{ППН}}$, $q_V^{\text{ППН}}$, $q_C^{\text{СН}}$ позволяют определять верхнее критическое давление потери устойчивости намотанного тороидального прочного корпуса под действием внешнего гидростатического давления и параметры волнообразования в зависимости от схемы намотки, вида армирующего материала и связующего, коэффициента заполнения объема ПКМ, количества монослоев, учитывая конструктивно-технологические особенности при производстве тороидального ПК кругового поперечного сечения и возникающую при намотке разнотолщинность вдоль поперечного сечения.

Полученные аналитические решения обеспечивают хорошую чувствительность к параметрам структуры намотанного тороидального прочного корпуса, что позволяет проводить параметрическое исследование с целью поиска такой последовательности укладки и выбора состава ПКМ, которые бы увеличивали критическое давление.

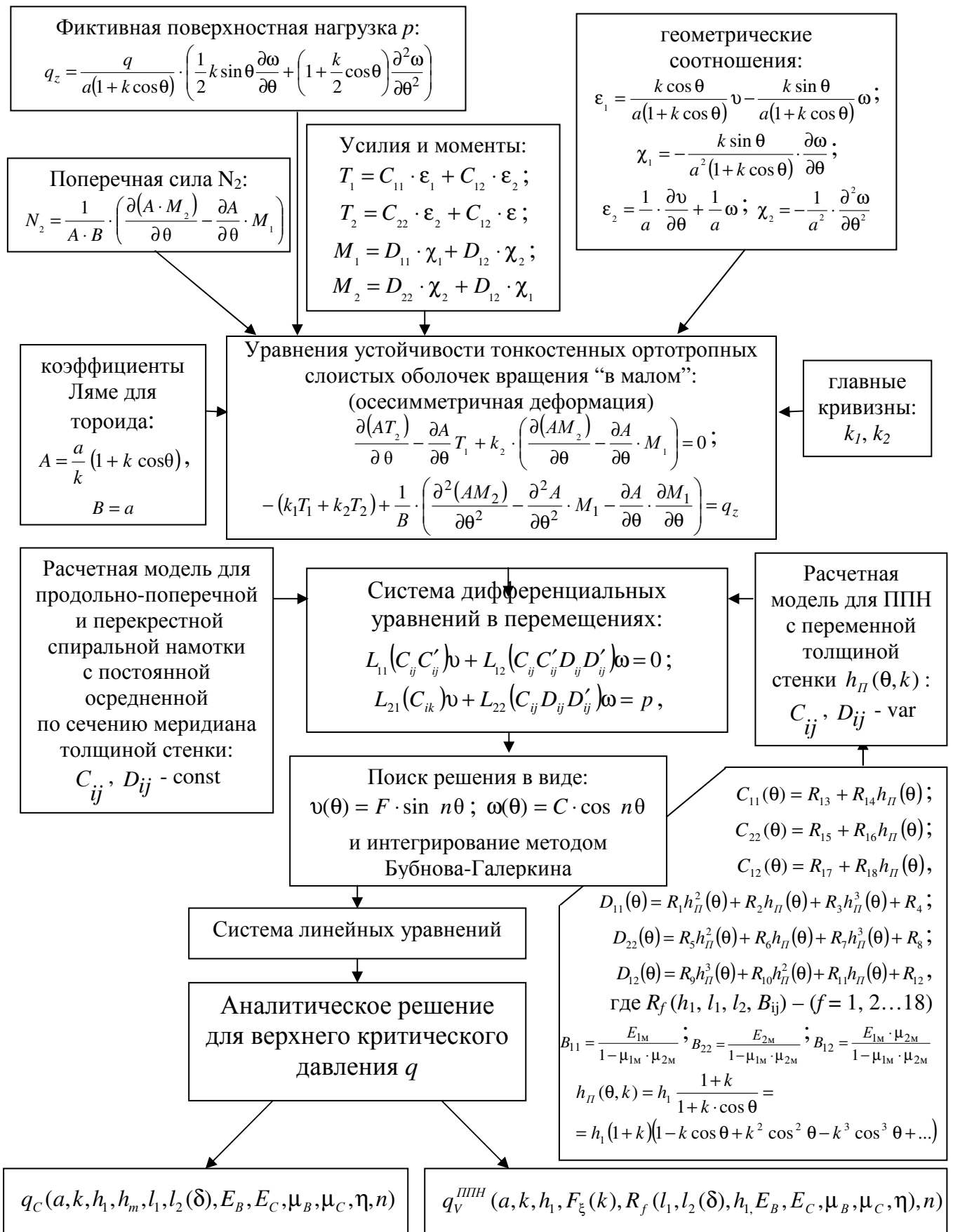


Рисунок 3.5 – Блок-схема расчета верхнего критического давления потери устойчивости при гидростатическом сжатии намотанного тороидального прочного корпуса

На базе полученного аналитического выражения для верхней критической нагрузки потери устойчивости (3.8) реализована методика разработки схемы армирования прочного тороидального корпуса из полимерных композиционных материалов с позиции потери устойчивости в виде листа табличных вычислений в системе математического моделирования Mathcad (приложение А).

3.4 Выводы по разделу

1. Усовершенствована математическая модель потери устойчивости тороидального прочного корпуса под действием внешнего гидростатического давления, которая построена на базе классической линейной теории слоистых ортотропных оболочек с учетом в отличие от существующих моделей конструктивно-технологических особенностей формования тороида методом намотки из полимерных композиционных материалов, а именно, законы распределения толщин каждого монослоя вдоль меридиана.

2. С помощью метода Бубнова-Галеркина впервые получены аналитические выражения для верхнего критического давления потери устойчивости при гидростатическом сжатии круговой тороидальной оболочки на базе расчетных моделей структуры КМ с переменной и осредненной постоянной толщиной монослоев в дискретной постановке.

3. Впервые разработана расчетно-аналитическая методика проектирования тороидального прочного корпуса, изготавливаемого методом продольно-поперечной намотки, при ограничении по устойчивости, которая включает возможность варьирования в широком диапазоне свойств связующего и армирующего материала с целью рационального выбора конструкционных материалов и схем армирования.

Результаты данного раздела опубликованы в работах [136, 144, 145].

РАЗДЕЛ 4

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТОРОИДАЛЬНОГО ПРОЧНОГО КОРПУСА, ВЫПОЛНЕННОГО НАМОТКОЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследуется влияние выбора структурных моделей композиционного материала, параметров армирования и упругих характеристик композиционного материала на расчетные значения верхнего критического давления потери устойчивости тороидального прочного корпуса при гидростатическом сжатии.

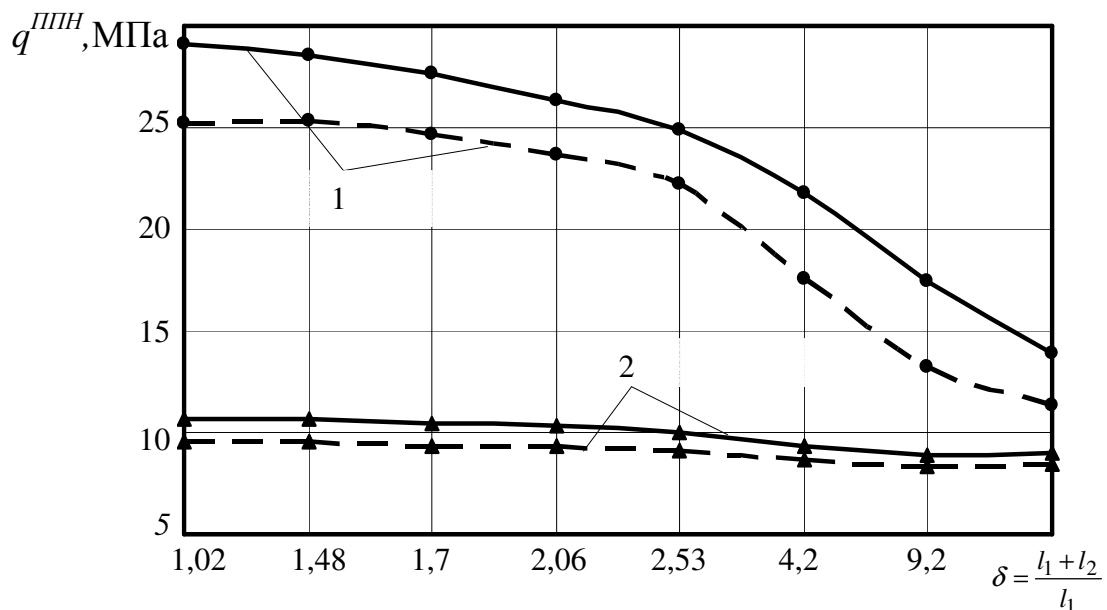
4.1 Влияние схемы намотки и учета переменности толщины тороидального прочного корпуса, выполненного намоткой из полимерных композиционных материалов, на величину верхнего критического давления

Выполняется сравнительная оценка эффективности разработанного метода расчета верхнего критического давления на основе расчетной модели для ППН с осредненной постоянной толщиной стенки по сравнению с методом расчета с учетом переменной толщины вдоль меридиана.

Проектные переменные в задаче – это количество однонаправленных монослоев фиксированной толщины, укладываемых в каждом из направлений армирования, и свойства армирующего наполнителя – модули упругости и коэффициенты Пуассона углеродных и стеклянных волокон. Направления армирования ограничены следующими схемами армирования: продольно-поперечной с кодом $[(0_1^\circ/90_1^\circ)_{l_1}(0^\circ)_{l_1}]$ и спиральной геодезической с кодом $[\pm\varphi_G]_{l_1}$.

Согласно экспериментальным данным [54, 146] толщина продольного монослоя из СП взята $h_1^{\text{СП}} = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м, из УП – $h_1^{\text{УП}} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м.

Сравнивались корпуса одинаковой осредненной толщины ($\Delta_m = \text{const}$) при одинаковых $k = a/R$ (масса корпуса постоянна) (рис. 4.1, 4.2). Относительная толщина Δ_m определяется выражением $\Delta_m = \frac{h_m}{a}$, где h_m – средняя по меридиальному сечению толщина композитной тороидальной оболочки переменной толщины. Если сравниваются оболочки с различными k и $\Delta_m = \text{const}$, то они имеют одинаковую площадь материала в меридиальном сечении.

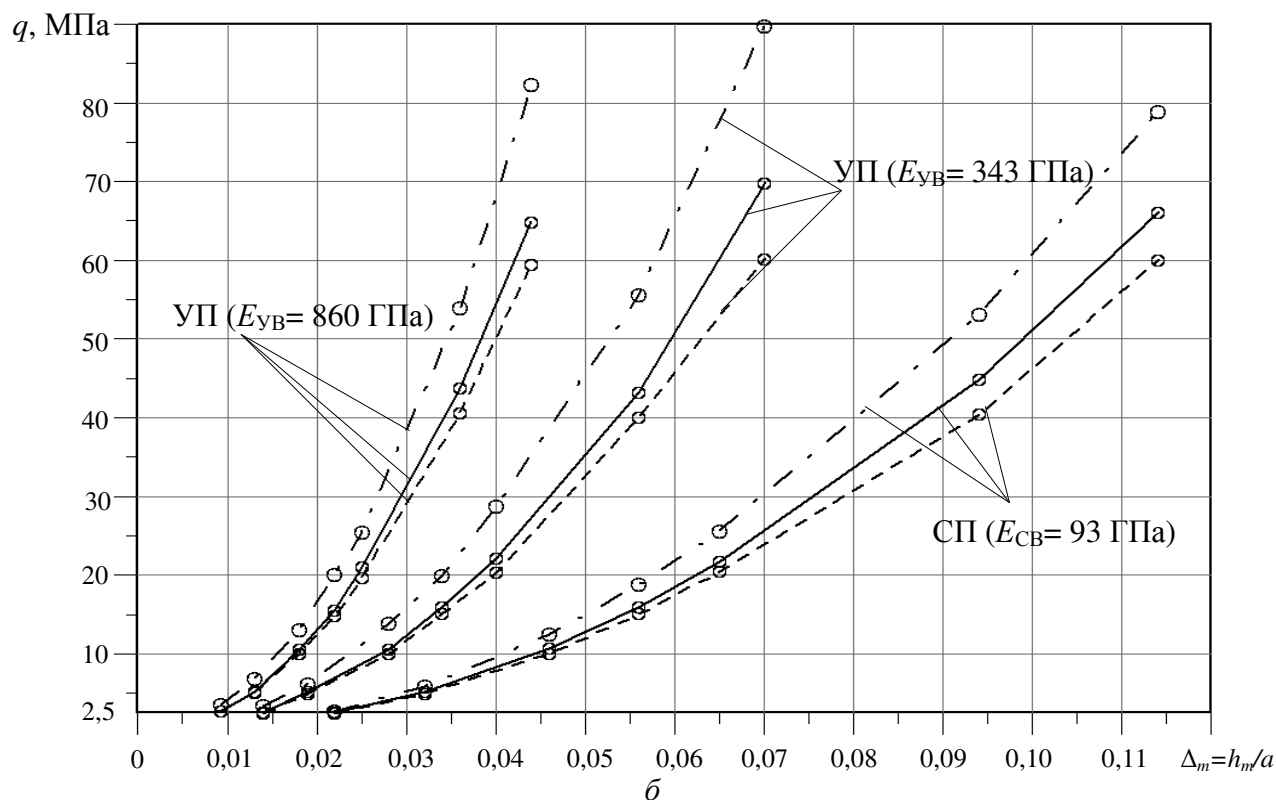
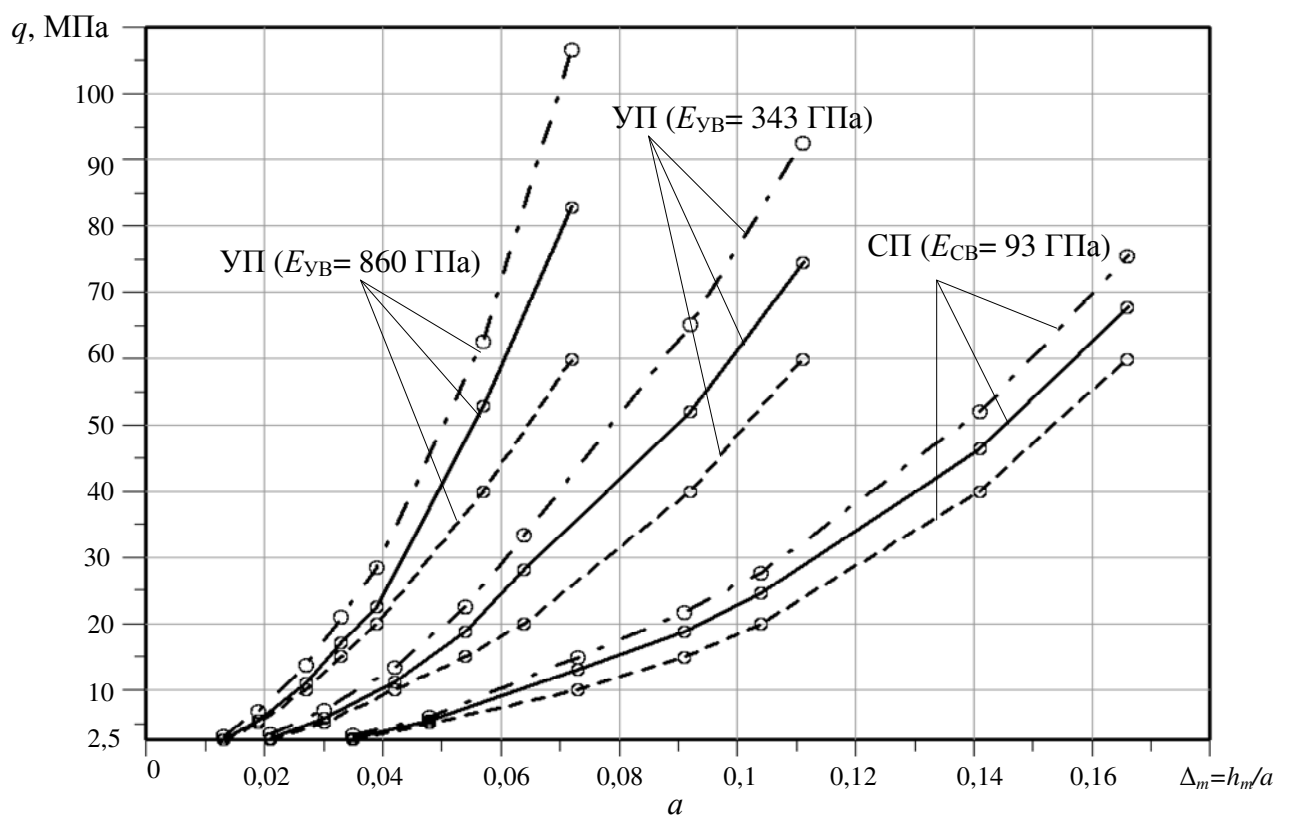


1 – УП М35J/ ЭДТ-10; 2 – СП ВМПС/ ЭДТ-10;

— — — $q_C^{\text{ППН}}$; - - - - $q_V^{\text{ППН}}$

Рисунок 4.1 – Зависимость верхнего критического давления для тороидальных оболочек переменной и осредненной постоянной толщины, формируемых продольно-поперечной намоткой $[(0_1^\circ / 90_1^\circ)_{l_1} (0^\circ)_{l_2}]$ из УП и СП, от параметра δ при $a = 0,5$, $k = 0,25$, $\Delta_m = h_m/a = 0,05$

При использовании в изготовлении тороидальной оболочки методом продольно-поперечной намотки низко модульной ленты (например, из стекловолокна) величина верхнего критического давления становится нечувствительной к δ . Из рис. 4.1 видно, что при соотношении модулей упругости монослоя из стеклопластика $E_{1M}/E_{2M} = 2,85$ для различных структур композиционного материала, полученных при намотке тороидальной оболочки с продольно-поперечной схемой армирования, величины верхнего критического давления отличаются на 13,5% для решения q_V и 16,5 % q_C [136].



- - - - симметричная геодезическая намотка $[\pm \varphi]$ с $h_m = \text{const}$ (q_C);
 — — — — ППН $(0^\circ/90^\circ)_l$ (решение q_C); - - - - - ППН $(0^\circ/90^\circ)_l$ (решение $q_V^{\text{ППН}}$)

Рисунок 4.2 – Сравнение величин верхнего критического давления для тороидальных прочных корпусов с $k = 0,143$ (а) и $k = 0,33$ (б) из УП и СП, спроектированных на основе расчетных моделей с переменной и осредненной постоянной толщиной вдоль сечения меридиана, от Δ_m

При увеличении доли поперечных слоев в общей массе оболочки величина верхнего критического давления уменьшается (см. рис. 4.1), как и количество полуволн потери устойчивости n .

Показано (см. рис. 4.2), что максимум критического давления достигается при формировании тороидальных оболочек перекрестной симметричной намоткой. Это объясняется повышением модулей упругости как в поперечном, так и в продольном направлениях.

Наибольшее расхождение в случае изготовления продольно-поперечной намоткой не превышает 38% для k от 0,1 до 0,2 (рис. 4.2), что связано, вероятно, с неустойчивым состоянием формы потери устойчивости из-за перехода от бесконечно длинной цилиндрической оболочки ($k = 0$) к тороидальной. При $k > 0,15 \dots 0,2$, что зависит от проектируемой глубины погружения, разница между величинами верхнего критического давления для тороидальных корпусов с осредненной постоянной и переменной толщиной увеличивается от 2 до 16% с увеличением исследуемой расчетной глубины погружения до 6000 м.

Сравнивается влияние на верхнее критическое давление спиральной геодезической намотки и ППН с $(0^\circ / 90^\circ)_{l_1}$. Расчет давления проводился, используя расчетную схему с осредненной постоянной толщиной, поскольку получение решения для спиральной намотки с учетом переменных толщины и угла намотки вдоль меридиана оказывается слишком трудоемким.

Установлено, что замена расчета тороидальной оболочки со структурой слоистого материала с монослоями переменной толщины на оболочку с осредненной толщиной монослоев переменной толщины по всему поперечному сечению приводит к увеличению величины верхнего критического давления до 40 %.

На рис. 4.1 и 4.2 видно, что критическая нагрузка q_c , полученная при расчете с осредненной толщиной поперечного монослоя, больше $q_V^{ППН}$. Это объясняется тем, что перераспределение материала вдоль меридиана

существенно влияет на величину критической нагрузки, что также описано авторами [103, 105] при исследовании устойчивости и напряженно-деформированного состояния тороидальных оболочек, находящихся по действию внешнего равномерного давления, с учетом ортотропии материала и произвольно взятого закона изменения толщины вдоль меридиана. Поэтому при расчете устойчивости и распределения напряжений в намотанных тороидальных оболочках необходимо учитывать закон изменения толщины.

4.2 Анализ влияния упругих свойств различных конструкционных материалов на величину верхнего критического давления потери устойчивости при гидростатическом сжатии

Выполняется комплексное исследование влияния структурных и механических параметров композиционных материалов, порядка расположения армированных слоев, геометрии тороидального прочного корпуса, полученного методом продольно-поперечной намотки, на его устойчивость, в частности на величину верхнего критического давления.

На рис. 4.3 и 4.4 представлены зависимости верхнего критического давления от k для тороидальных прочных корпусов из УП и СП одинаковой толщины с относительной толщиной $\Delta_m = 0,05$ и $\Delta_m = 0,1$. Тороидальные оболочки получены продольно-поперечной намоткой со схемами армирования $(0_1^\circ/90_1^\circ)_l$ и $[(0_1^\circ/90_1^\circ)_l(0^\circ)_l]$. [147]

Для тороидального ПК, полученного ППН из СП, роль поперечного усиления для k от 0 до 0,5 незначительно и разница между величинами верхнего критического давления составляет 1-2% (см. рис. 4.3, 4.4). Для корпуса, полученного ППН из УП на основе высокомодульных и сверхвысокомодульных волокон, при $k > k_s$ рациональной схемой армирования является схема, когда соотношение поперечных слоев к продольным = 1 ($\delta = 1$).

k_s зависит только от толщины корпуса Δ_m . Увеличение количества поперечных монослоев при $k > k_s$ при сравнении корпусов одинаковой массы (когда $\Delta_m = h_m/a = \text{const}$), приводит к снижению верхнего критического давления.

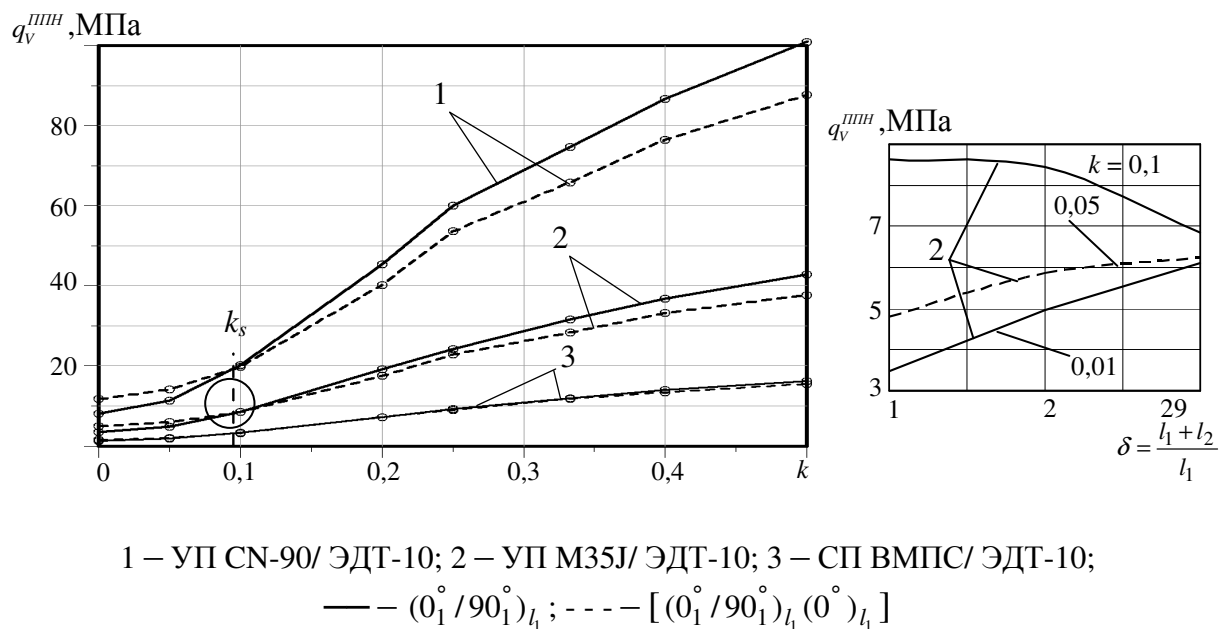


Рисунок 4.3 – Зависимость верхнего критического давления для углепластиковых и стеклопластиковых тороидальных прочных корпусов с $\Delta_m = 0,05$, полученных ППН, от k

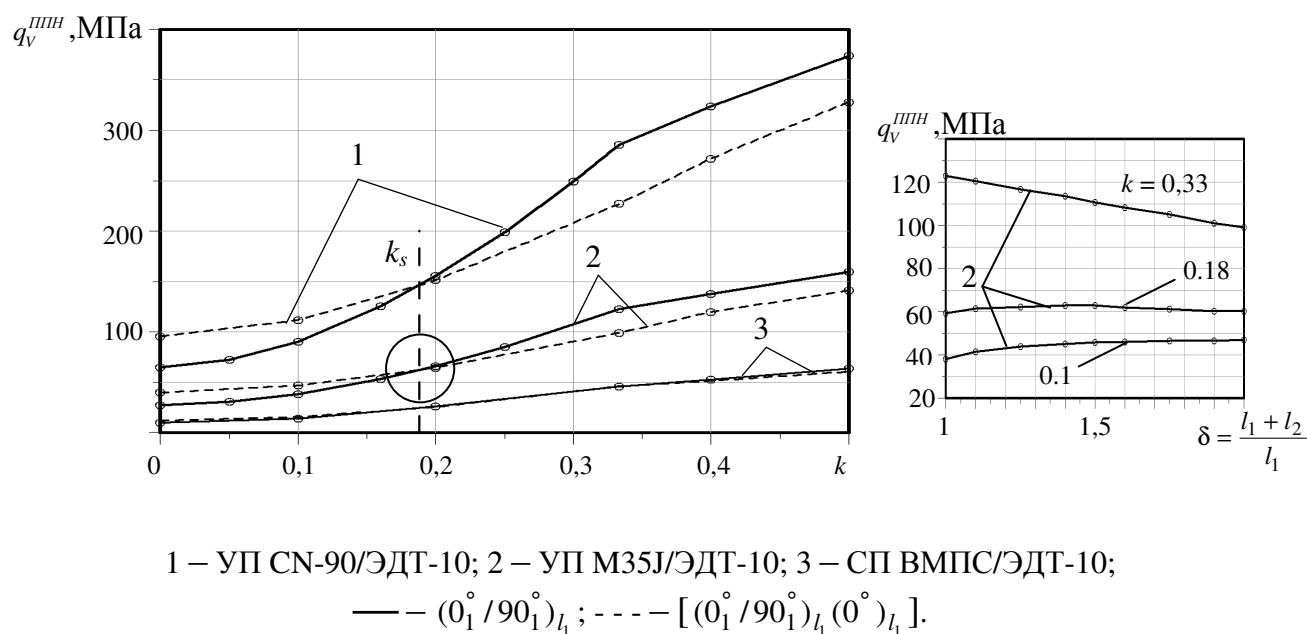


Рисунок 4.4 – Зависимость верхнего критического давления для углепластиковых и стеклопластиковых тороидальных прочных корпусов ($\Delta_m = 0,1$) из УП и СП, полученных ППН, от k

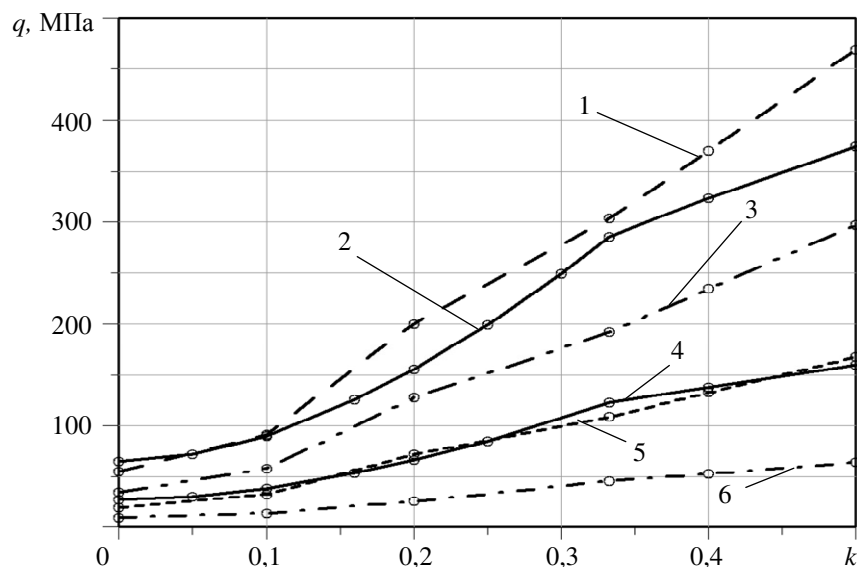
При $k = 0$ имеем случай бесконечно длинной цилиндрической оболочки, для которой оптимальной схемой армирования при нагружении внешним равномерным давлением является схема с соотношением поперечных монослоев к продольным равным 2 ($\delta = 2$), что согласуется с исследованиями, проведенными ранее для композитных цилиндрических оболочек [141]. Этим и объясняется наличие перехода k_s .

Для тороидальных ПК из УП такие переходы в окрестности k_s ярко выражены и имеют существенное значение, в отличие от оболочки из СП, у которого модуль упругости монослоя вдоль волокон больше в 2 раза (или практически одинаковы) модуля упругости поперек волокон. В то время как для монослоя из УП такое соотношение модулей упругости составляет 10 – 20.

Для тороидальных ПК с $k > k_s$ для увеличения критического давления при одинаковой массе корпуса необходимо увеличивать жесткость в продольном направлении. Увеличить жесткость проектируемого тороидального ПК в продольном направлении возможно формированием его перекрестной спиральной намоткой.

Используя решение (3.9), оценена эффективность применения СП и УП в качестве материалов для тороидальных прочных корпусов, полученных методом непрерывной намотки, по сравнению с металлами (рис.4.5).

Выполненное сравнение УП и СП с традиционно применяемыми в настоящее время металлами для ПК, таких как, высокопрочная сталь (АК-25, АК-37), титановые (марки ВТ) и алюминиевые (марки В95Т) сплавы, показало, что тороидальный ПК из УП на основе сверхвысокомодульных волокон ($E_{ув} = 860$ ГПа) при ограничении только по верхнему критическому давлению уступает только стали (см. рис. 4.5). При этом плотность УП в 4,3 раза меньше плотности стали, что делает намотанный тороидальный ПК из УП более легким и технологичным. Поэтому тороидальный ПК из УП, полученный методом намотки, имеет существенные преимущества перед аналогичным ПК из металлов. [148, 149]



1 – сталь; 2 – УП (CN-90/ЭДТ-10) со схемой армирования $(0_1^\circ/90_1^\circ)_l$;

3 – титановый сплав; 4 - УП (M35J/ЭДТ-10) со схемой армирования $(0_1^\circ/90_1^\circ)_l$;

5 – алюминиевый сплав; 6 - СП (BMPC/ЭДТ-10) со схемой армирования $(0_1^\circ/90_1^\circ)_l$

Рисунок 4.5 – Зависимость верхнего критического давления для тороидальных прочных корпусов ($\Delta_m = 0,1$) из разных конструкционных материалов от k [148]

Выражения для верхнего критического давления потери устойчивости металлических тороидальных ПК получены как частный случай решения q_C^{CH} , что соответствует решению, полученному Т.И. Кошелевой [91] для изотропных тороидальных оболочек постоянной толщины.

4.3 Выводы по разделу

1. Дополнительно получены научные данные о влиянии схемы армирования, геометрических параметров корпуса, перспективных марок армирующего наполнителя и связывающего, переменности толщины и ее осреднения в намотанном тороидальном корпусе на величину верхнего критического давления, используя численный анализ упругих характеристик слоистого композиционного материала. Результаты параметрических исследований представлены в виде графиков зависимости величины верхнего критического давления от указанных характеристик.

2. Установлено, что замена расчета тороидальной оболочки со структурой слоистого материала со слоями переменной толщины на оболочку с осредненной постоянной толщиной слоев вдоль поперечного сечения приводит к завышению величины верхнего критического давления до 40% для k от 0,1 до 0,2, что связано, вероятно, с неустойчивым состоянием формы потери устойчивости из-за перехода от бесконечно длинной цилиндрической оболочки ($k = 0$) к тороидальной. При $k > 0,15 \dots 0,2$, что зависит от проектируемой глубины погружения, разница между величинами верхнего критического давления для тороидальных корпусов с осредненной постоянной и переменной толщиной увеличивается от 2 до 16% с увеличением исследуемой расчетной глубины погружения до 6000 м.

3. Проведена сопоставительная оценка результатов расчёта верхнего критического давления тороидальных оболочек из углепластика и стеклопластика, полученных продольно-поперечной намоткой $(0_1^\circ/90_1^\circ)_l$, и традиционно применяемых металлов для прочных корпусов подводных технических средств (стали, титанового и алюминиевого сплавов). Показано, что намотанный тороидальный прочный корпус из УП на основе сверхвысокомодульных волокон с позиции потери устойчивости оказывается более легким и технологичным по сравнению с другими конструкционными материалами.

Результаты данного раздела опубликованы в работах [136, 147 – 150].

РАЗДЕЛ 5

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОРОИДАЛЬНОГО ПРОЧНОГО КОРПУСА ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

5.1 Анализ влияния физико-механических свойств различных конструкционных материалов и геометрии тороидального прочного корпуса на его массогабаритные показатели с позиции потери устойчивости

Главная задача проектировочного расчета прочного корпуса для подводной техники заключается в создании рациональной оболочечной конструкции, обладающей наряду с необходимой устойчивостью и прочностью наименьшим весом. Требование минимального веса особенно важно для прочного корпуса в подводных конструкциях. При сравнении нескольких прочных корпусов с равными глубинами погружения и равными объемами лучшим следует считать прочный корпус, имеющий меньшее $m_{ПК}/m_w$.

Рассматривается влияние армирующего материала (см. табл. 2.1) и геометрии тороида ($0 \leq k \leq 0,5$) на массогабаритные показатели тороидальных прочных корпусов, выполненных продольно-поперечной намоткой, при ограничении по устойчивости, используя формулу (3.9).

Соотношение $m_{ПК}/m_w$ рассчитывалось по формулам: [151]

$$m_{ПК} = 4 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot R \cdot \rho \cdot h_m; \quad (5.1)$$

$$m_w = 2 \cdot \pi^2 \cdot (a + h_m) \cdot R \cdot \rho_w; \quad (5.2)$$

$$m_{ПК} / m_w = 2 \cdot \frac{a \cdot h_m}{a + h_m} \cdot \frac{\rho}{\rho_w}; \quad (5.3)$$

где $m_{ПК}$ – масса тороидального прочного корпуса;

ρ – плотность корпусного материала, кг/м^3 ;

h_m – осредненная по меридиану толщина намотанного тороидального корпуса с $h(\theta)$, $h_m = \text{const}$;

m_w – водоизмещение тороидального прочного корпуса;

ρ_w – плотность морской воды ($\rho_w = 1010 \text{ кг/м}^3$ [152]).

Осредненная по меридиану намотанной тороидальной оболочки из углепластика и стеклопластика толщина h_m в формуле (5.3) определялась следующим образом. Используя решение (3.9) для определения верхнего критического давления на основе модели расчета намотанной тороидальной оболочки переменной толщины с продольно-поперечной схемой армирования $(0_1^\circ/90_1^\circ)_{l_1}$. при ограничении на глубину погружения находилась данная структура, предусматривающая определение количества продольных и поперечных слоев. Затем составлялся слоистый пакет композиционного материала (рис. 3.2) с осредненными по меридиану толщинами поперечных слоев, в результате чего для каждого значения глубины погружения определялась толщина h_m .

Для расчета соотношения $m_{ПК}/m_w$ использовалась система Mathcad. Результаты расчетов представлены в графическом виде на рис. 5.1 – 5.4 [153].

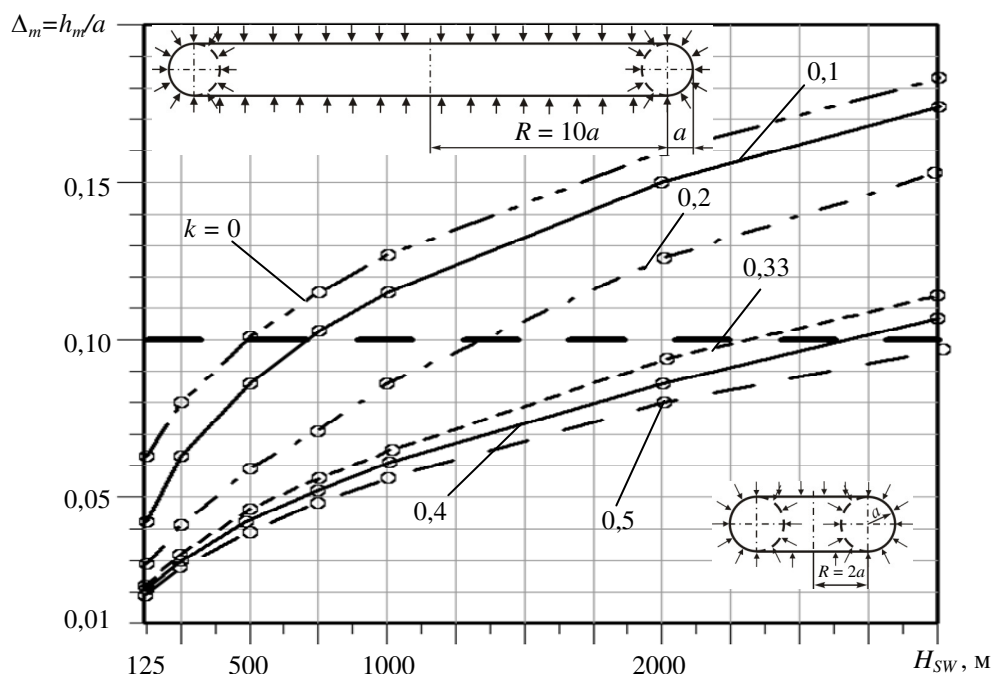


Рисунок 5.1 – Зависимость относительной толщины $\Delta_m = h_m/a$ тороидального прочного корпуса переменной толщины, полученного продольно-поперечной намоткой ($\delta=1$) из СП (ВМПС/ЭДТ-10), от рабочей глубины погружения при $0 \leq k \leq 0,5$

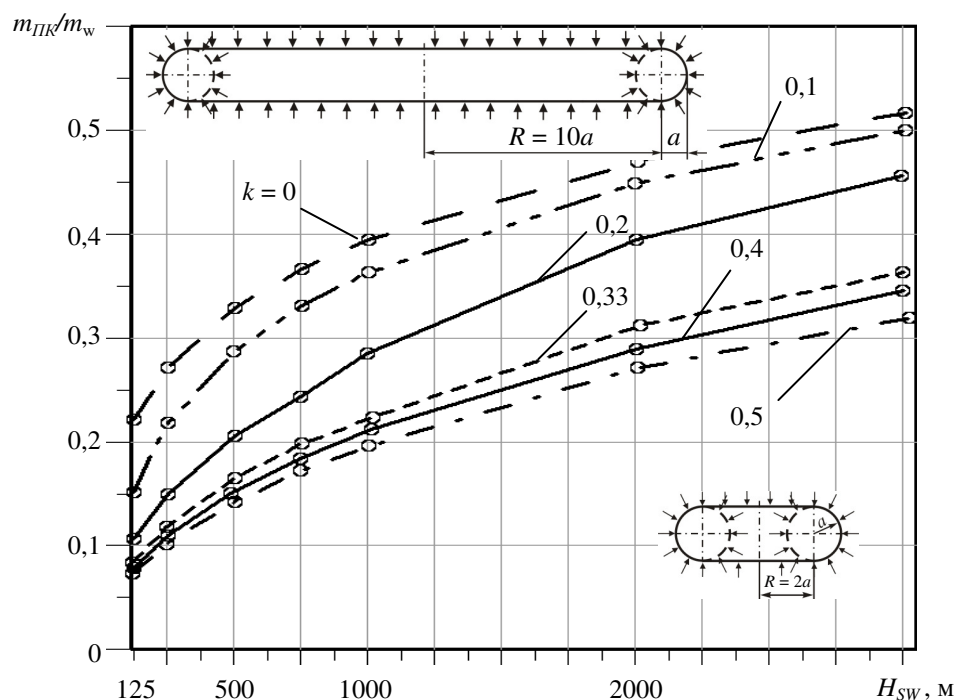


Рисунок 5.2 – Зависимость отношения массы тороидального прочного корпуса переменной толщины, полученного продольно-поперечной намоткой ($\delta=1$) из СП (ВМПС/ЭДТ-10), к его водоизмещению $m_{ПК}/m_w$ от рабочей глубины погружения при $0 \leq k \leq 0,5$

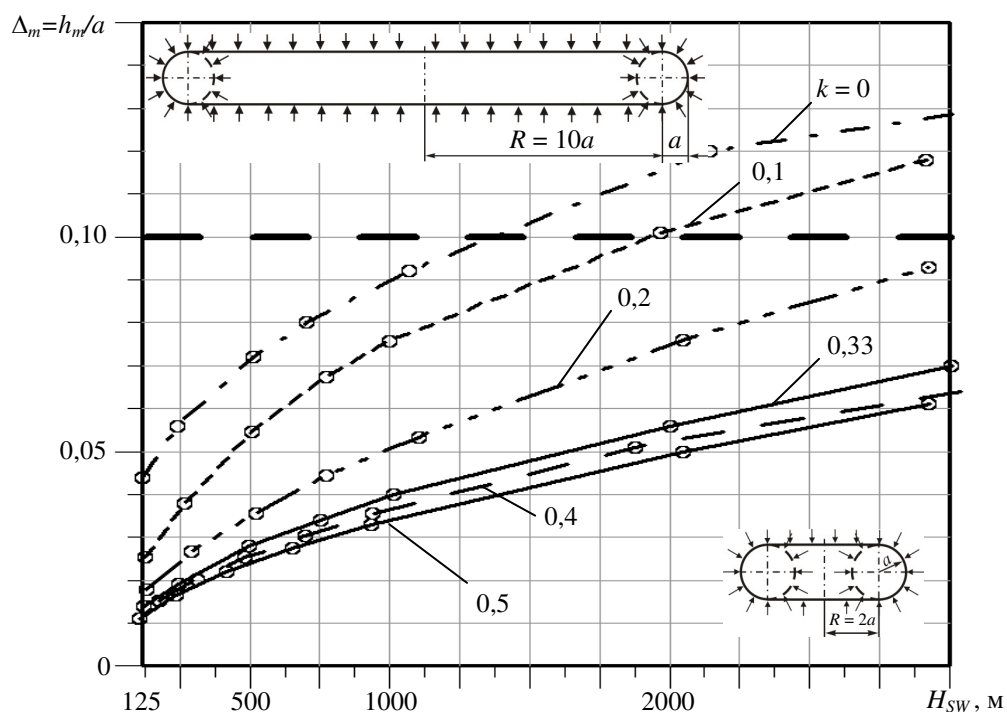


Рисунок 5.3 – Зависимость относительной толщины $\Delta_m = h_m/a$ тороидального прочного корпуса переменной толщины, полученного продольно-поперечной намоткой ($\delta=1$) из УП (М35J/ ЭДТ-10), от рабочей глубины погружения при $0 \leq k \leq 0,5$

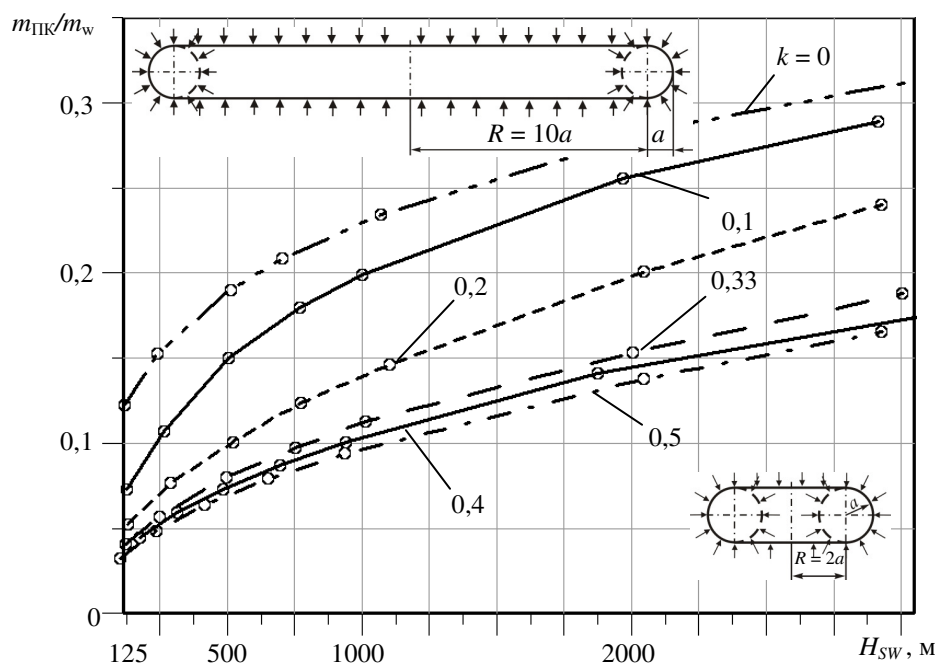


Рисунок 5.4 – Зависимость отношения массы тороидального прочного корпуса переменной толщины, полученного продольно-поперечной намоткой ($\delta=1$) из УП (М35J/ ЭДТ-10), к его водоизмещению $m_{ПК}/m_w$ от рабочей глубины погружения при $0 \leq k \leq 0,5$

Оценка эффективного запаса плавучести при ограничении по верхнему критическому давлению проводилась с использованием коэффициента безопасности $f_S = 2$ [42]. В результате рабочая глубина погружения – $H_{SW} = h_{SW}/f_S$.

Для тороидальных прочных корпусов, выполненных продольно-поперечной намоткой, с увеличением k ($0 \leq k \leq 0,5$) средняя толщина, а соответственно, и соотношение $m_{ПК}/m_w$ уменьшается (рис. 5.1 – 5.4).

Для тороида, полученного ППН с $\delta = 1$, при увеличении k с 0,33 до 0,5 (кривые $k = 0,33$; 0,4; 0,5 на рис. 5.2, 5.4) выигрыш в значении соотношения $m_{ПК}/m_w$ не существен. Гуляевым В. И. [104], Ганеевой М. С. [106] и другими авторами теоретически исследовалось влияние утолщений стенки изотропных и ортотропных тороидальных оболочек в зонах внутреннего и внешнего экваторов и в зонах нулевой Гауссовой кривизны ($\theta = 90^\circ$; 270° , см. рис. 1.16) на величину давления потери устойчивости под действием внешнего равномерного давления, и ими установлено, что только увеличение толщины в зонах нулевой Гауссовой кривизны приводят к существенному росту критического давления. Согласно закону распределения толщины стенки вдоль

меридиального сечения при намотке толщина корпуса в окрестностях $\theta = 90^\circ$ и 270° для k от 0,33 до 0,5 меняется незначительно (см. рис. 3.3, 3.4). Влияние утолщений стенки тороидального корпуса из ПКМ на величину давления потери устойчивости под действием внешнего гидростатического давления с учетом технологии формования, например, методом автоматизированной укладки, может быть предметом для дальнейшего исследования.

Поэтому практический интерес с точки зрения массогабаритных показателей представляют тороидальные прочные корпуса, изготавливаемые методом намотки, с $0,1 < k < 0,25 \dots 0,33$.

У аппаратов, предназначенных для малых глубин, толщину прочного корпуса выбирают в первую очередь из конструктивных и технологических соображений и без четкой зависимости от глубины. [6]

СП без увеличения модуля упругости стекловолокон неэффективен, а также из-за необходимости увеличения толщины оболочки с увеличением проектируемой глубины погружения (см. рис. 5.1). А при толщине стенки намотанного изделия свыше 80 мм трудно обеспечить стабильность прочностных свойств готового изделия. [42]

Рассматривается влияние физико-механических свойств традиционно применяемых металлов для прочных корпусов подводных технических средств, таких как: сталь ($\sigma_{0,2} = 800-900$ МПа), титановый и алюминиевый сплавы; и КМ – углепластиков CN-90/ЭДТ-10, М35J/ЭДТ-10 и стеклопластика ВМПС/ЭДТ-10, полученных продольно-поперечной намоткой, на массогабаритные показатели ($m_{ПК}/m_w$ и Δ_m) тороидальных прочных корпусов круглого поперечного сечения с $k = 0,143$ (рис. 5.5, 5.6 – для проекта подводной буровой платформы с тороидальным ПК (см. рис. 1.2, б) и $k = a/R = 0,33$ (см. рис. 5.7).

Для намотанного тороидального прочного корпуса из углепластика и стеклопластика с $k = 1/3$ рассматривалась схема армирования с одинаковым количеством продольных и поперечных монослоев $(0_1^\circ/90_1^\circ)_{l_1}$, поскольку при

такой структуре композиционного материала и геометрии ($k = 1/3$) оболочка будет иметь максимальное верхнее критическое давление (см. рис. 4.3, 4.4).

На этапе предварительного проектирования при ограничении по верхнему критическому расчетная толщина тороидального прочного корпуса с $k = 0,33$, полученного из УП (CN-90/ ЭДТ-10), для диапазона рабочей глубины погружения $125 \text{ м} \leq H_{\text{SW}} \leq 3000 \text{ м}$ почти равна толщине аналогичного корпуса из стали с $\sigma_{0,2} = 800 \dots 900 \text{ МПа}$ (разница в толщинах не превышает 5%) (см. рис. 5.7, а). А при всех других равных условиях (одинаковых k и рабочей глубине погружения) расчетное соотношение $m_{\text{ПК}}/m_w$ для стального корпуса, для которого характерна более высокая удельная жесткость по сравнению с другими металлическими сплавами (табл. 1.2), при всех других равных условиях (одинаковых k и глубине погружения) выше $m_{\text{ПК}}/m_w$ для углепластикового корпуса (CN-90/ ЭДТ-10) в 4,3 – 4,5 раз и для корпуса из М35J/ ЭДТ-10 2,8 – 3 раз.

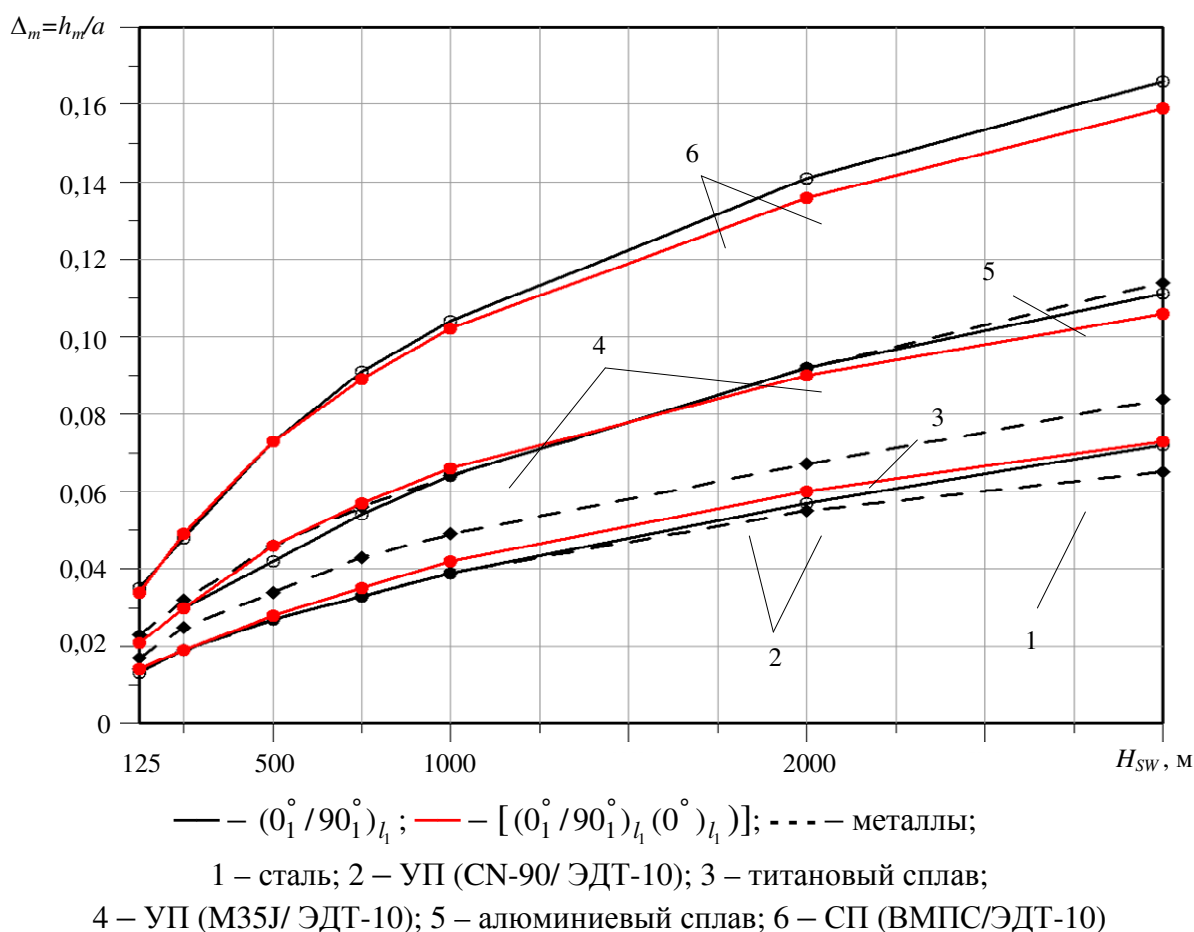


Рисунок 5.5 – Зависимость относительной толщины $\Delta_m = h_m/a$ для тороидального прочного корпуса ($k = 0,143$) подводной буровой платформы [14] от разных корпусных материалов и рабочей глубины погружения

Согласно полученным графическим данным (рис. 5.5 – 5.7) следует, что тороидальный ПК из УП обладает самым низким соотношением $m_{ПК}/m_w$ по сравнению с СП и другими материалами, традиционно используемых в подводном судостроении, а следовательно обладает большей положительной плавучестью. Ведь чем выше вес материала прочного корпуса или корпусов подводного технического средства, оборудования, размещаемого внутри него или снаружи, тем больше требуется дополнительной плавучести, в качестве которой в настоящее время используется синтактная пена с плотностью 500...600 кг/м³. Использование большого количества элементов плавучести увеличивает габариты подводного аппарата. А это не способствует увеличению скорости движения аппарата под водой и уменьшает маневренность подводного судна.

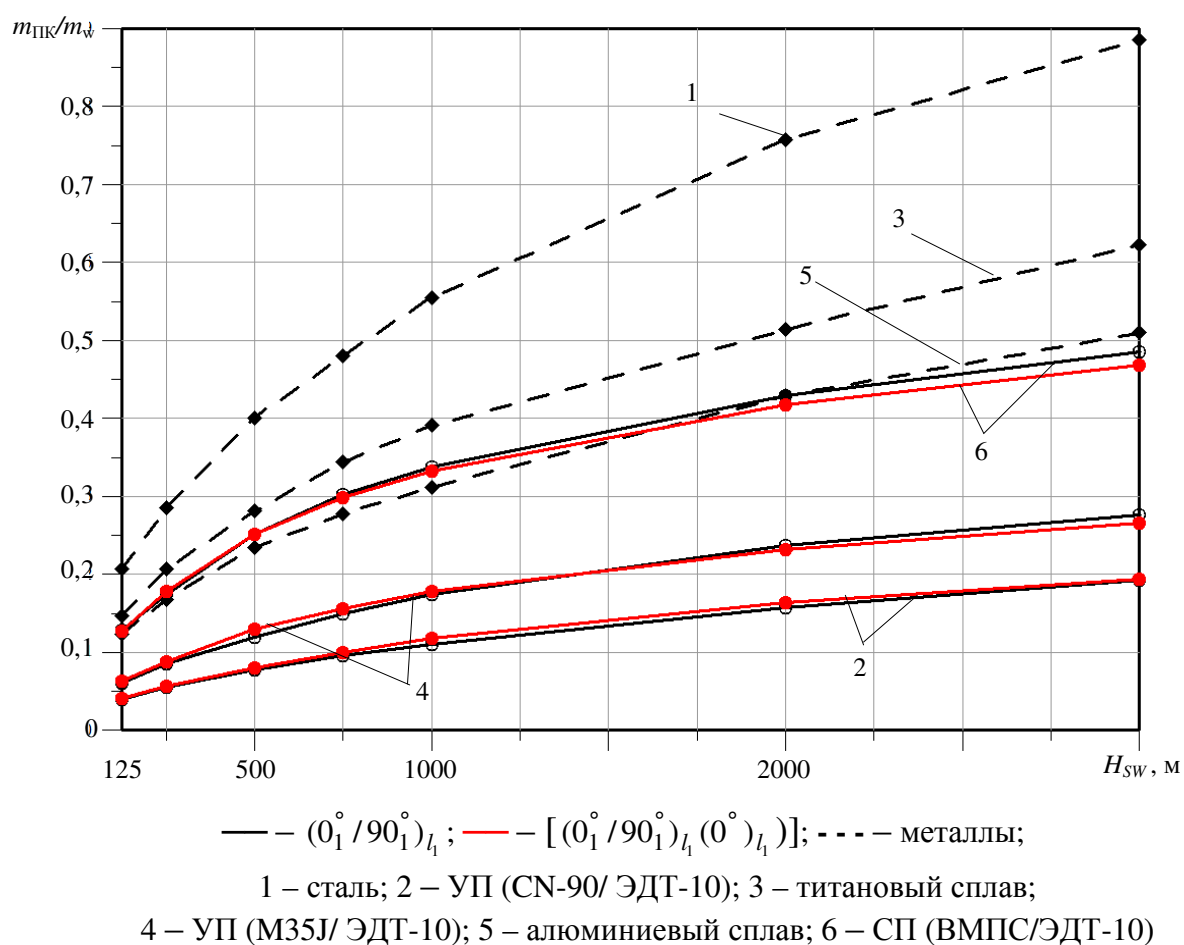
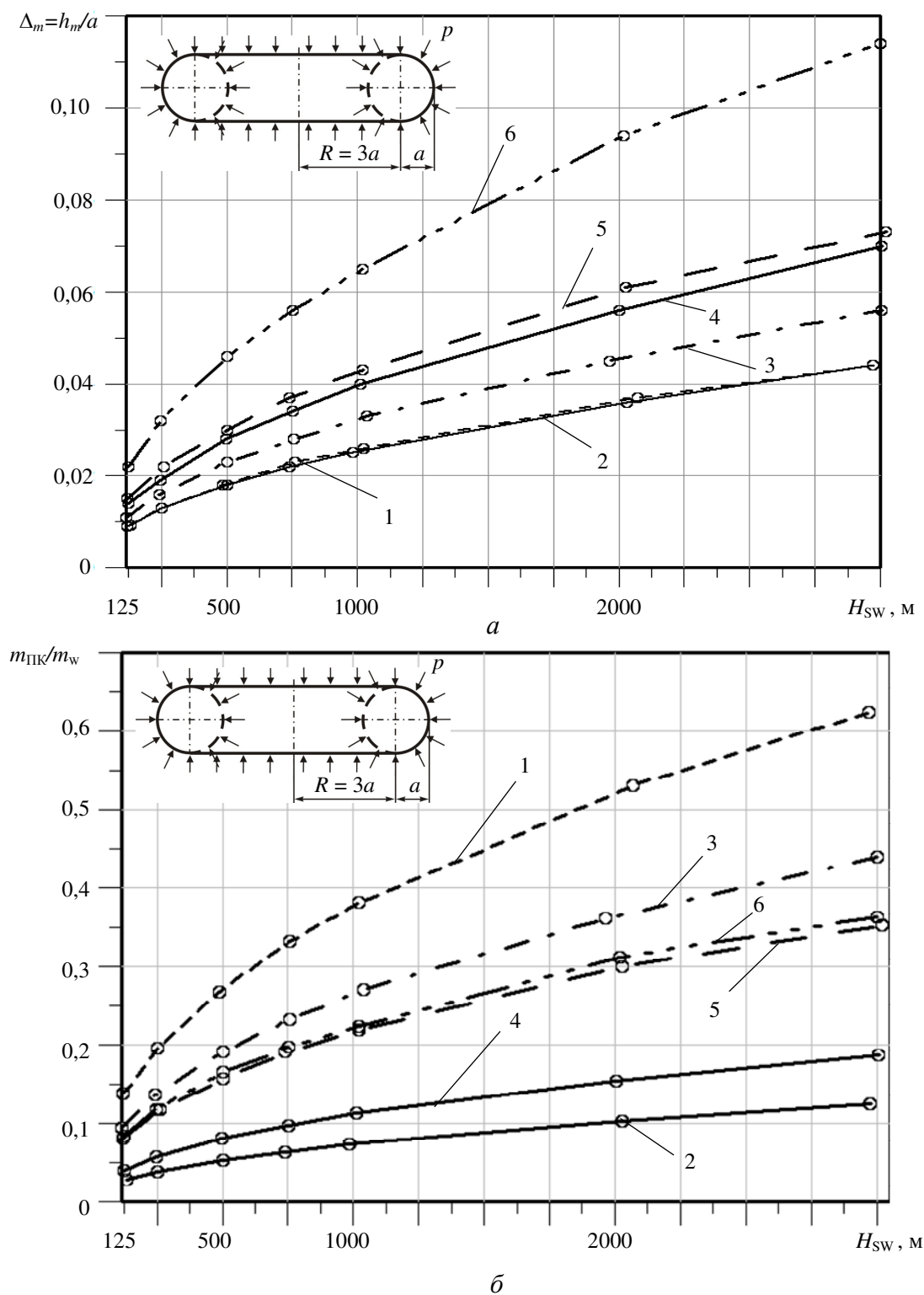


Рисунок 5.6 – Зависимость отношения массы тороидального прочного корпуса ($k = 0,143$) из разных корпусных материалов к его водоизмещению $m_{ПК}/m_w$ от рабочей глубины погружения



a – зависимость относительной толщины $\Delta_m = h_m/a$ тороидального прочного корпуса от рабочей глубины погружения;

b – зависимость отношения массы корпуса к его водоизмещению $m_{ПК}/m_w$ от рабочей глубины погружения

1 – сталь; 2 – УП (CN-90/ ЭДТ-10) со схемой армирования $(0_1^\circ/90_1^\circ)_l$;

3 – титановый сплав; 4 – УП (М35J/ ЭДТ-10) со схемой армирования $(0_1^\circ/90_1^\circ)_l$;

5 – алюминиевый сплав; 6 – СП (ВМПС/ЭДТ-10) со схемой армирования $(0_1^\circ/90_1^\circ)_l$

Рисунок 5.7 – Влияние физико-механических свойств корпусных материалов на массогабаритные показатели тороидального прочного корпуса с $k = 1/3$

Для тороидальных ПК одинакового водоизмещения с $k = 0,143$ (см. рис. 5.5, 5.6) расчеты велись для продольно-поперечной схем армирования $[(0_1^\circ/90_1^\circ)_{l_1}(0^\circ)_{l_1}])$ и $(0_1^\circ/90_1^\circ)_{l_1}$. Согласно полученным кривым роль поперечного усиления незначительна для волокнистых КМ как с низко модульным, так и высоко модульными наполнителями и разница между $m_{ПК}/m_w$ не превышает 5%.

В современных металлических подводных лодках соотношение $m_{ПК}/m_w$ не должно превышать 23%. Согласно рис. 5.7 этому условию для тороидального прочного корпуса с $k = 1/3$ с рабочей глубиной погружения ниже 1000 м удовлетворяют только 2 конструкционных материала из рассмотренных – углепластики CN-90/ЭДТ-10 и M35J/ЭДТ-10.

Технология изготовления тороидального прочного корпуса из металлов предполагает изготовление сварной конструкции. Поэтому соотношение $m_{ПК}/m_w$ для сварного корпуса из легированной стали, титанового и алюминиевого сплавов будет больше расчетного.

Технология изготовления тороидального прочного корпуса методом намотки, благодаря которой корпус может быть изготовлен целиком, и использование композиционных материалов с высокой удельной прочностью и жесткостью способствуют уменьшению $m_{ПК}/m_w$.

5.2 Прочность и рациональное проектирование тороидального прочного корпуса из композиционных материалов для подводных аппаратов

Разработан алгоритм проектировочного расчета и выбора рациональных параметров ПКМ для тороидального ПК (рис. 5.8) на основе требований прочности и устойчивости, формализованных в виде основного критерия качества прочного корпуса – отношения массы корпуса к его водоизмещению. В основе алгоритма лежит полученное в третьем разделе аналитическое решение для верхнего критического давления потери устойчивости тороидального ПК переменной толщины, выполненного методом намотки.

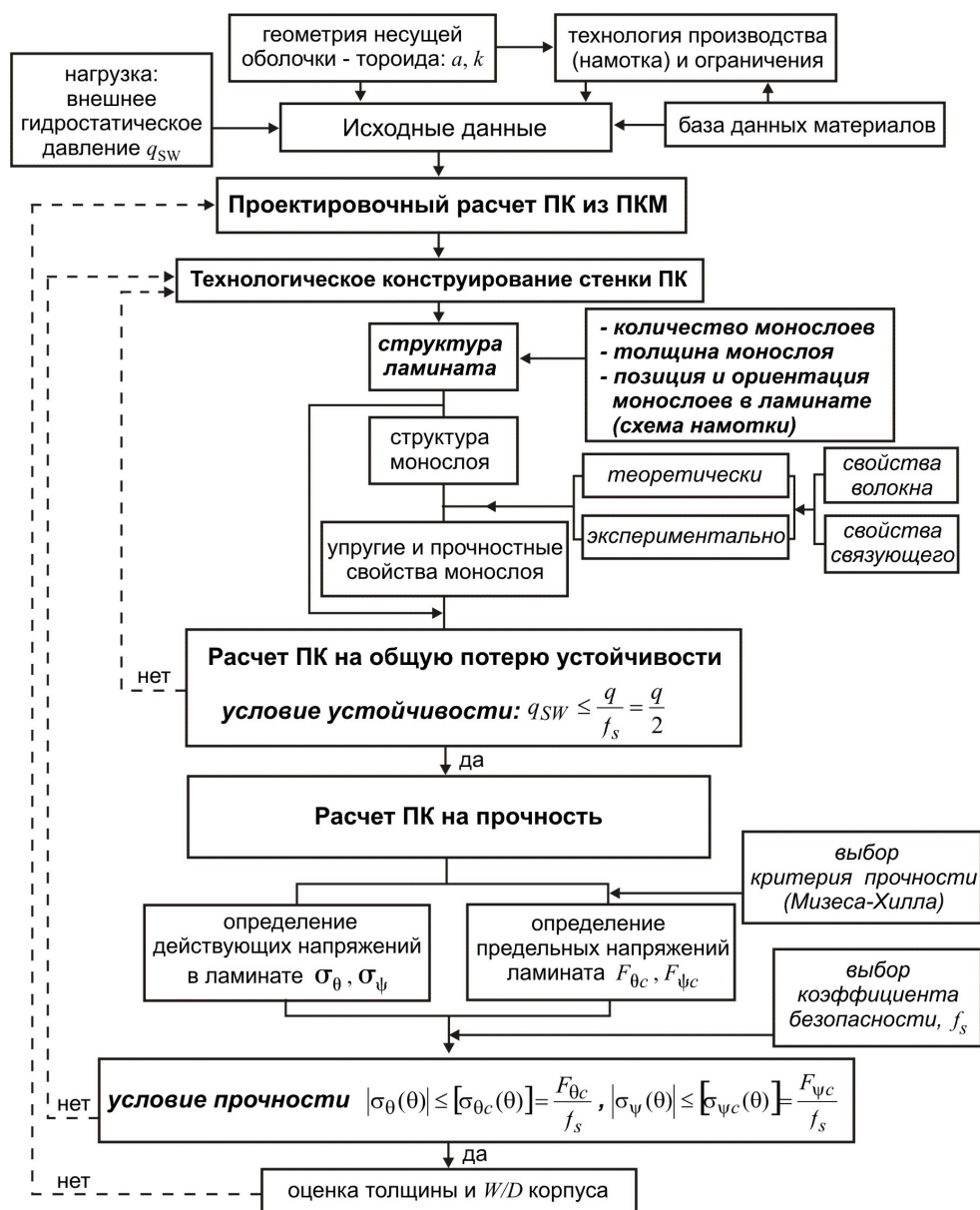


Рисунок 5.8 – Блок-схема алгоритма проектировочного расчета и выбора рациональной структуры ПКМ для намотанного тороидального ПК

Процедура проектировочного расчета многослойного КМ для тороидального корпуса, нагруженного внешним равномерным давлением, состоит из 3-х основных этапов:

- 1) Определение структуры многослойного КМ – количество монослоев с различными углами укладки (намотки), их толщина и позиция в многослойном материале.
- 2) Оценка устойчивости многослойного композита по верхнему критическому давлению.

Условие устойчивости:

$$q_{sw} \leq \frac{q}{f_s} = \frac{q}{2}, \quad (5.4)$$

где q_{sw} – рабочее давление;

q – верхнее критическое давление;

f_s – коэффициент запаса (безопасности), $f_s = 2$.

3) Определение параметров и оценка корпуса из ПКМ по прочности; ограничения по прочности приняты в виде критерия Мизеса-Хилла [154]:

$$|\sigma_\theta(\theta)| \leq [\sigma_{\theta c}(\theta)] = \frac{F_{\theta c}}{f_s}; \quad |\sigma_\psi(\theta)| \leq [\sigma_{\psi c}(\theta)] = \frac{F_{\psi c}}{f_s};$$

$$\frac{\sigma_\theta^2(\theta)}{F_{\theta c}^2} - \frac{\sigma_\theta(\theta) \cdot \sigma_\psi(\theta)}{F_{\theta c} \cdot F_{\psi c}} + \frac{\sigma_\psi^2(\theta)}{F_{\psi c}^2} \leq 1. \quad (5.5)$$

Для сохранения условия равнопрочности по устойчивости и напряжениям согласно рекомендациям [6] и опыта проектирования композитных намотанных цилиндрических прочных корпусов [42] в (5.4) и (5.5) коэффициент запаса (безопасности) при проектировании тороидальных корпусов из композиционных материалов принят равным $f_s = 2$.

Из-за большого количества проектных параметров при проектировании конструкций из ПКМ сложно указать рациональный путь решения задачи. Для ПКМ конструктивная прочность и жесткость определяется в основном прочностью и модулем упругости армирующих волокон.

Сравнение эффективности применения различных армирующих волокнистых наполнителей для намотанного тороидального ПК на основе требований прочности и общей устойчивости проводится на примере корпуса с $k = 1/3$, выполненного продольно-поперечной намоткой. Как было установлено в 4 разделе, корпус, выполненный продольно-поперечной намоткой с одинаковым количеством продольных и поперечных монослоев $(0_1^\circ / 90_1^\circ)_1$, при ограничении по верхнему критическому давлению будет иметь минимальную массу.

В качестве корпусных материалов рассмотрены СП и УП на эпоксидном связующем, поскольку ПКМ на их основе обладают высокой прочностью при сжатии и сдвиге. Свойства волокнистых армирующих наполнителей E_B и

связующего E_M и свойства однонаправленных КМ на их основе, принимаемые для расчетного анализа, указаны в таблицах 2.1 и 5.1.

Для проведения проверочного расчета прочности корпуса по выбранным в четвертом разделе толщине и структуре ПКМ, удовлетворяющим только требованию обеспечения устойчивости (5.4), необходимо знать величины действующих напряжений в ламинате (слоистом ПКМ, имеющем форму оболочки), предельные напряжения ламината и выбрать запас прочности (коэффициент безопасности).

Таблица 5.1 – Свойства однонаправленных эпоксипластиков, принятые для расчета композитного тороида [155]

Характеристика	СП	УП		
	S-2 GLASS/ Ероху [128]	IM10/ Ероху [132]	M35J / Ероху [127]	CN-90/ Ероху [129]
Коэффициент заполнения объема волокнами, η	0,6	0,6	0,6	0,6
Модуль упругости в направлении армирования E_{1M} , ГПа	59	190	207	550
Модуль упругости в поперечном направлении E_{2M} , ГПа	20	7,39	7,4	5,4
Коэффициент Пуассона в направлении армирования μ_{21}	0,28	0,348	0,348	0,344
Предел прочности в направлении армирования при растяжении F_{1r} , МПа	2000	3310	2470	1800
Предел прочности в направлении армирования при сжатии F_{1c} , МПа	1240	1793	1270	370
Предел прочности в поперечном направлении при сжатии F_{2c} , МПа	200	180	180	180

Согласно [113, 156] при $k \leq 0,5$ для определения напряжений σ_θ , σ_ψ в тороидальной оболочке, подвергнутой осесимметричному нагружению, может использоваться безмоментное решение Фёппля, согласно которому напряжения от мембранных усилий T_1 , T_2 :

$$\sigma_\theta(\theta) = \frac{T_2}{h_\Sigma(\theta, k)} = \frac{1 + 0,5 \cdot k \cdot \cos\theta}{1 + k \cdot \cos\theta} \cdot \frac{p \cdot a}{h_\Sigma(\theta, k)}; \sigma_\psi(\theta) = \frac{T_1}{h_\Sigma(\theta, k)} = \frac{p \cdot a}{2 \cdot h_\Sigma(\theta, k)},$$

где $h_\Sigma(\theta, k)$ – переменная толщина пакета КМ из монослоев [53].

Выбор КМ, обеспечивающего минимальную массу конструкции, не столь очевиден, как при одноосном растяжении или сжатии в направлении армирования,

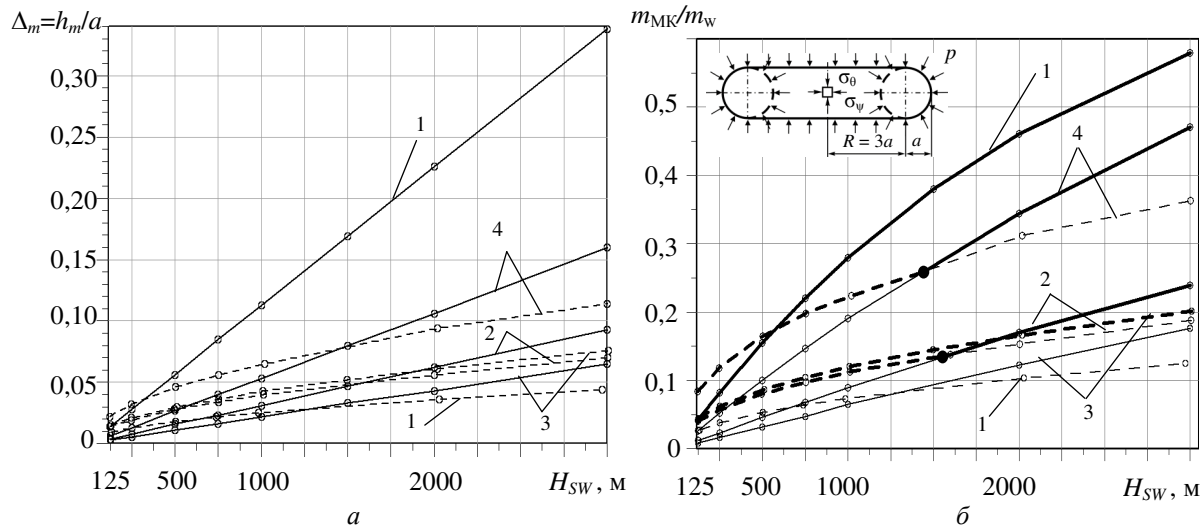
когда можно пользоваться традиционной оценкой материала по величине его удельной прочности [154]. Для определения прочностных свойств ламината необходимо знать его структуру и упругие и прочностные свойства его составляющих монослоев. Структура ламината включает количество и тип различных монослоев, их позицию и ориентацию внутри ламината. [156] Затем необходимо выбрать критерий прочности ламината.

Пределы прочности $F_{\theta}(\theta)$ и $F_{\psi}(\theta)$, модули упругости $E_{\theta}(\theta)$, $E_{\psi}(\theta)$ и $\mu_{\theta\psi}(\theta)$ ламината определены аналитически (табл. 5.2) на основе критерия прочности Мизеса-Хилла по методике прогнозирования прочности КМ, изложенной в [154]. Пределы прочности монослоев F_1 , F_2 взяты из баз данных, которые предоставляют фирмы-производители (см. табл. 5.1).

Таблица 5.2 – Рассчитанные по методике прогнозирования прочности КМ, изложенной в [154], свойства ламината, получаемого при изготовлении тороидального ПК ($k = 1/3$) продольно-поперечной намоткой $(0_1^{\circ}/90_1^{\circ})_{l_1}$

		Модуль упругости в поперечном направлении E_{θ} , ГПа	Модуль упругости в направлении ψ E_{ψ} , ГПа	Коэффициент Пуассона $\mu_{\theta\psi}$	Предел прочности при сжатии в поперечном направлении $F_{\theta c}$, МПа	Предел прочности при сжатии в направлении ψ $F_{\psi c}$, МПа
СП S-2 GLASS/ Epoxy	$\theta = 0^{\circ}$	39,76	39,76	0,138	400	400
	$\theta = 180^{\circ}$	46,12	33,2	0,119	462,6	331,6
УП IM10/ Epoxy	$\theta = 0^{\circ}$	99,09	99,09	0,026	986,4	986,4
	$\theta = 180^{\circ}$	129,6	68,5	0,02	1292	683,8
УП M35J / Epoxy	$\theta = 0^{\circ}$	107,6	107,6	0,024	686,8	686,8
	$\theta = 180^{\circ}$	141	74,2	0,018	900,4	474,4
УП CN-90/ Epoxy	$\theta = 0^{\circ}$	262,8	262,8	0,01	188,8	188,6
	$\theta = 180^{\circ}$	347,8	177,7	0,0074	249,7	127,5

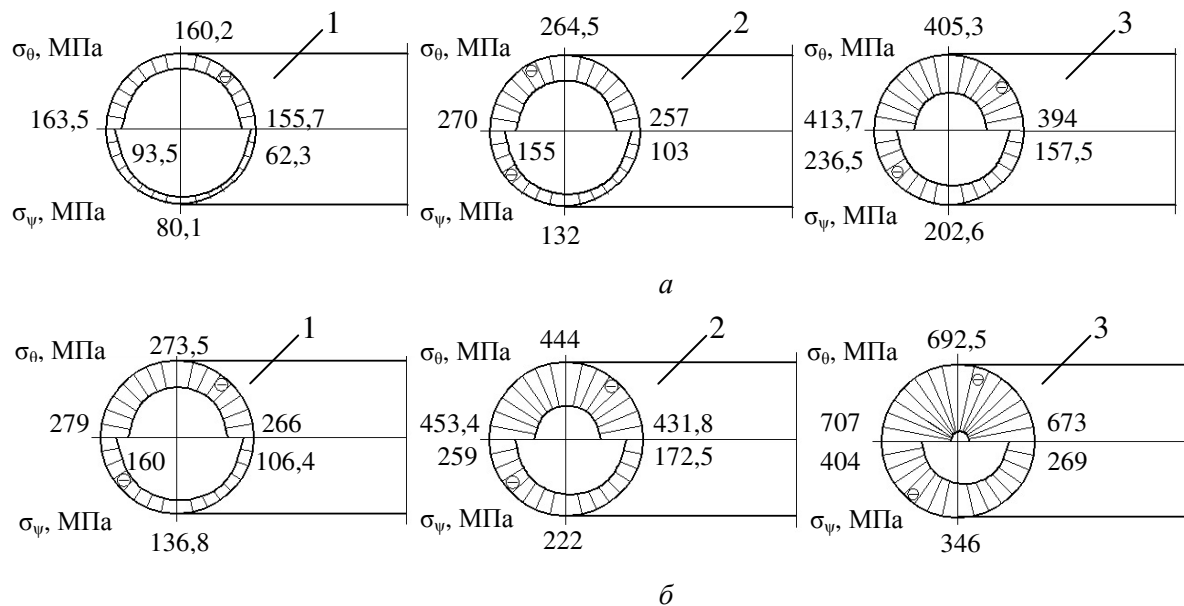
Подставляя данные из таблицы 5.2 в условия прочности (5.5), видно, что не для всех корпусов, спроектированных в 4 разделе только по условию устойчивости (5.4) на рабочие глубины до 3000 м, выполняется условие прочности по критерию Мизеса-Хилла (5.5) (рис. 5.9).



1 – УП CN-90/ Ероху; 2 – УП M35J/ Ероху; 3 – УП IM10/ Ероху; 4 – СП S-2 GLASS/ Ероху
 — – прочность (5.5); - - - - - устойчивость формы (5.4)

Рисунок 5.9 – Зависимость относительной осредненной по меридиану толщины Δ_m (а) и m_{MK}/m_w (б) тороидальных корпусов ($k = 1/3$), полученных продольно-поперечной намоткой $(0_1^\circ / 90_1^\circ)_I$, от рабочей глубины погружения H_{SW} и характера потери несущей способности корпуса для разных волокнистых армирующих наполнителей

Максимальных значений напряжения σ_θ и σ_ψ (рис. 5.10) для рассматриваемого корпуса с переменной толщиной в поперечном направлении достигают на внешнем экваторе ($\theta = 0^\circ$, см. рис. 1.16), тогда как для тороидальной оболочки с постоянной толщиной стенки наиболее нагруженными будут точки на внутреннем экваторе ($\theta = 180^\circ$, см. рис. 1.16) [107].



1 – СП S-2 GLASS/ Ероху; 2 – УП M35J/ Ероху; 3 – УП CN - 90/ Ероху

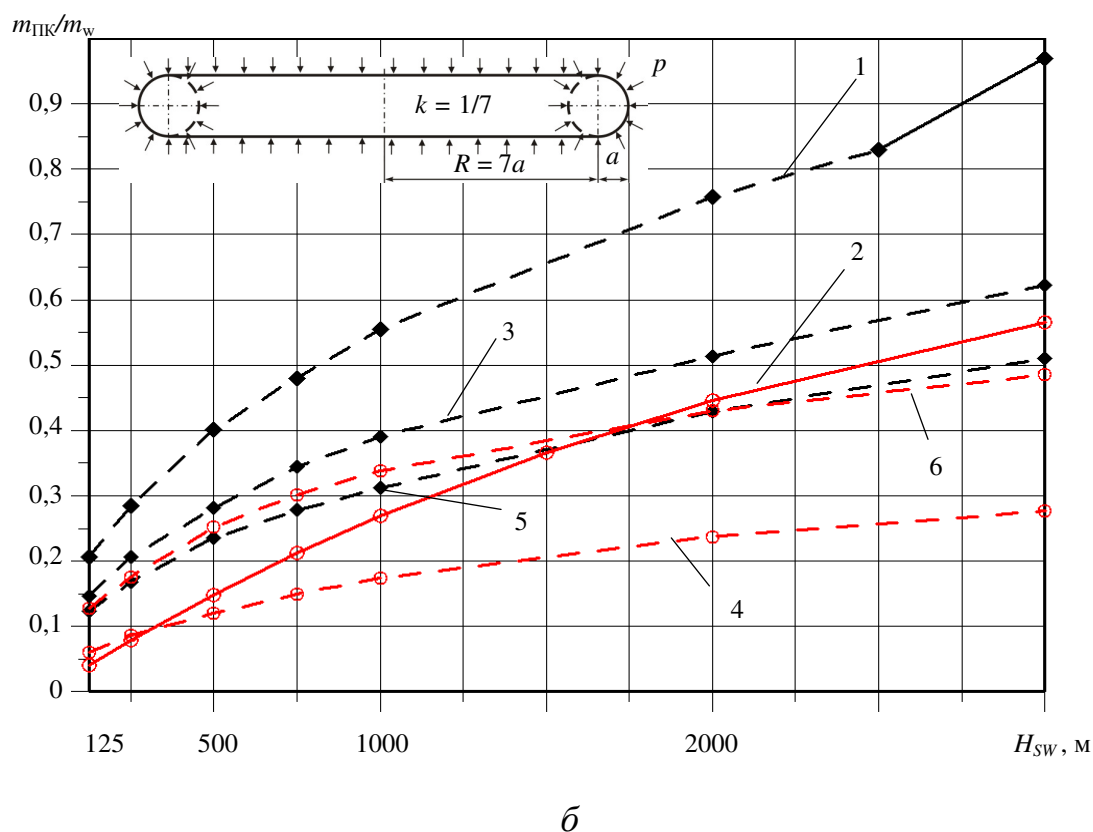
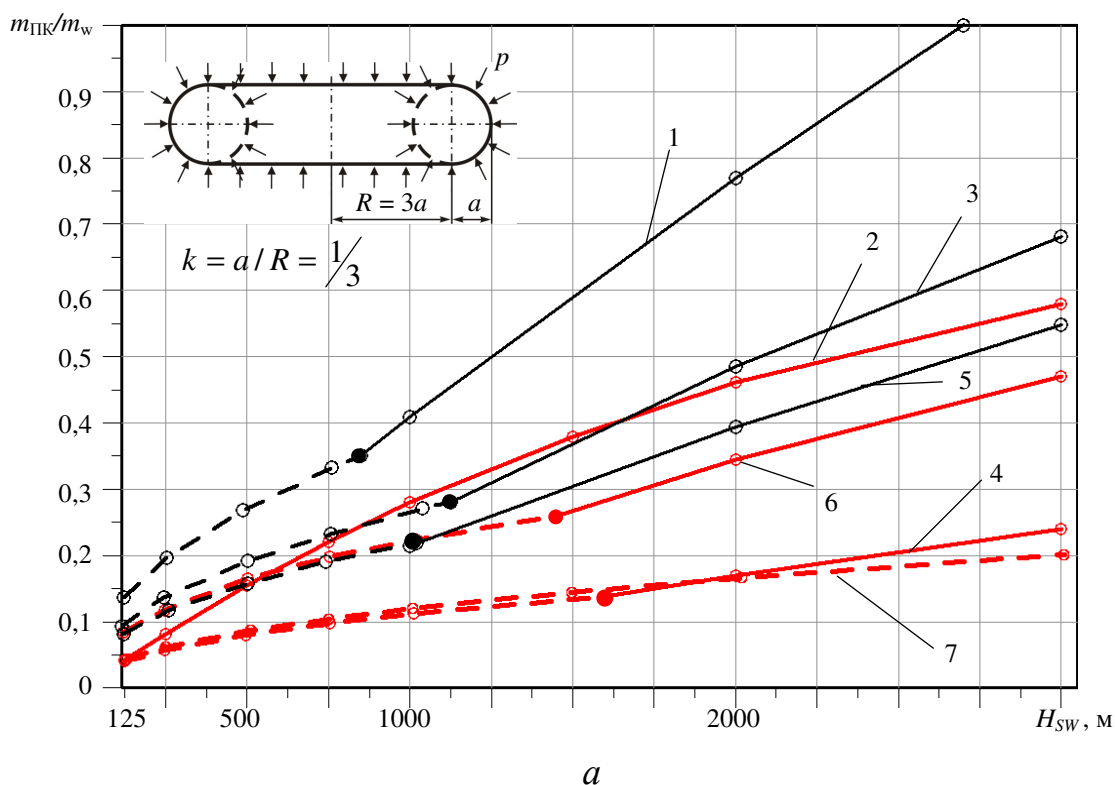
Рисунок 5.10 – Эпюры напряжений от мембранных усилий для намотанных тороидальных корпусов ($k = 1/3$) со структурой КМ $(0_1^\circ / 90_1^\circ)_I$ и толщиной, удовлетворяющей условию устойчивости по верхнему критическому давлению на глубине $H_{SW} = 1000$ м (а) и 3000 м (б)

Результаты проведенного проектировочного расчета тороидального корпуса, выполненного методом продольно-поперечной намотки из УП и СП, на примере корпуса с $k = 1/3$ при ограничениях по устойчивости (5.4) и прочности (5.5) представлены на рис. 5.9. Как видно из рис. 5.9, расчет тороидальных корпусов из эпоксиглепластика на основе сверхвысокомодульных волокон (CN-90/Ероху) необходимо вести из условий прочности. Хотя КМ на основе этих волокон при расчете только при ограничении по устойчивости по верхнему критическому давлению (см. рис. 5.9) обеспечивали самую минимальную массу корпуса. Это объясняется тем, что прочность на сжатие высокомодульных углеродных волокон ($E_B = 345...600$ ГПа) составляет 1,7 ГПа, сверхвысокомодульных ($E_B = 600...965$ ГПа) – 0,5 ГПа, хотя прочности на растяжение этих волокон одинаковы или ниже прочности стандартных ($E_B = 200...275$ ГПа) и средних по модулю ($E_B = 275...345$ ГПа) углеродных волокон. [134]

УП (М35J/Ероху, IM10/Ероху – см. рис. 5.9) на основе средних по модулю высокопрочных углеродных волокон ($E_B = 275...345$ ГПа, прочность на растяжение – 4500...7000 МПа) наиболее подходят для глубоководной техники и смогут реализовать $m_{МК}/m_w \leq 0,5$, обеспечивая выполнение условий устойчивости и прочности (5.4, 5.5).

Как видно из рис. 5.9, тороиды из УП М35J/Ероху надо рассчитывать из условия устойчивости (5.4) до $H_{SW} = 1550$ м, из УП IM10/Ероху – до $H_{SW} = 4100$ м, а тороиды из СП на основе высокопрочного стекловолокна из S-стекла – до $H_{SW} = 1450$ м. Для больших глубин расчет необходимо вести по критерию прочности (5.5). В тех случаях, когда условие прочности более «жесткое», чем ограничение по устойчивости (см. кривые 1, 2, 4 на рис. 5.9), необходимо исследовать другие структуры КМ с учетом конструктивных и производственных ограничений [42, 158] в целях уменьшения толщины корпуса, соответственно и его $m_{МК}/m_w$.

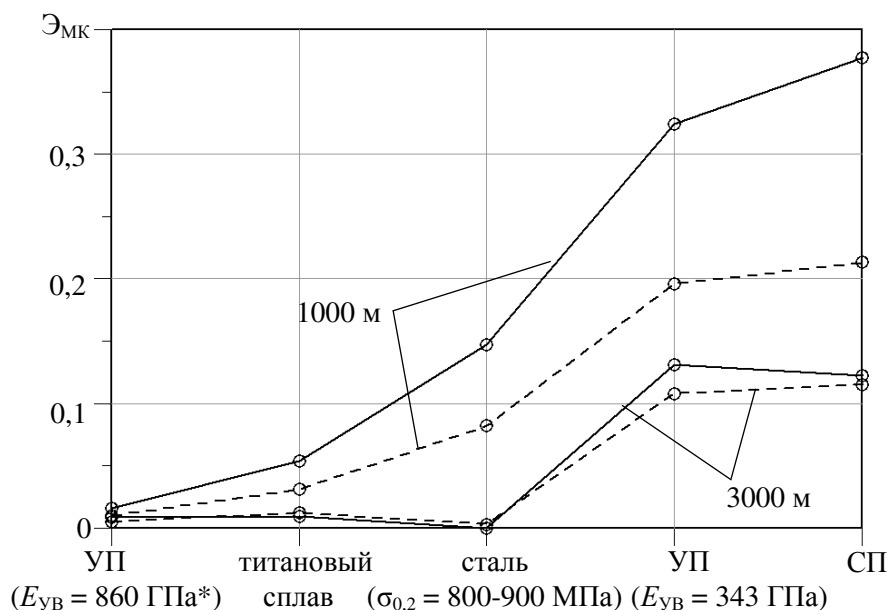
На основе разработанного алгоритма проведены численные расчеты для корпусов с $k = a/R = 0,33$ и 0,143 (рис. 5.11), спроектированных из разных конструкционных материалов.



1 – сталь; 3 – титановый сплав; 5 – алюминиевый сплав;
 ПКМ со схемой армирования $(0_1^\circ/90_1^\circ)_l$: 2 – УП CN-90/ЭДТ-10; 4 – УП M35J/ЭДТ-10;
 6 – СП ВМПС/ЭДТ-10; 7 – УП IM10/ЭДТ-10
 - - - статическая устойчивость формы; — прочность

Рисунок 5.11 – Зависимость отношения массы тороидального прочного корпуса с $k = 1/3$ (а [160]) и $k = 1/7$ (б) из разных материалов к его водоизмещению $m_{ПК}/m_w$ от глубины погружения H_{SW}

Сравнительные данные по стоимости различных материалов (см. табл. 5.3) приняты относительно стоимости 1 кг стали с $\sigma_{0,2} = 320$ МПа, поскольку стоимости корпусных материалов со временем меняются.



* — сверхвысокомодульное волокно

— — $k = 0,33$; - - - $k = 0,143$

Рисунок 5.12 – Результаты технико-экономической эффективности $\mathcal{E}_{МК}$ для тороидальных прочных корпусов подводной техники из разных материалов для глубин погружения H_{SW} 1000 и 3000 м

Применение сверхвысокомодульных углеродных волокон с модулем упругости $E_{УВ} = 600...965$ ГПа скорее всего, как следует из табл. 5.3, приведет к высокой стоимости тороидального прочного корпуса, поскольку сверхвысокомодульное углеродное волокно не высокопрочное и стоимость его высока (см. рис. 5.12).

Для рабочих глубин ниже 3000 м по стоимости и отношению $m_{ПК}/m_w$ при ограничениях по прочности (5.5) целесообразно выбирать УП на основе высокомодульных высокопрочных углеродных волокон ($E_{УВ} = 275...345$ ГПа).

Стоимость намотанного тороидального корпуса из УП на основе средних по модулю высокопрочных углеродных волокон ($E_{УВ} = 275...345$ ГПа) в $\sim 1,3$ раза больше стоимости корпуса из СП. Но с увеличением рабочей глубины

погружения без увеличения модуля упругости стекловолокон СП неэффективен из-за необходимости увеличения толщины оболочки, а при толщине стенки намотанного изделия свыше 80 мм трудно обеспечить стабильность прочностных свойств готового изделия. [42]

Выбор армирующего материала, обеспечивающего минимальную массу и максимум несущей способности корпуса, является достаточно неоднозначной задачей. При проектировании тороидальных прочных корпусов для подводной техники следует обращать внимание на согласованное повышение как прочности, так и жесткости однонаправленного ПКМ.

Иллюстрация в графическом виде (см. рис 5.12) сравнения эффективности различных материалов при ограничении по прочности (условие (5.5)) и устойчивости (условие (5.4)) позволяет сделать однозначный выбор в пользу того или иного материала в качестве конструкционного для тороидального прочного корпуса на предварительном этапе проектирования.

Для оценки эффективности ПК, получаемых другими схемами намотки, согласно предложенного в работе алгоритма необходимо проводить полный анализ влияния всего пространства параметров проектирования – геометрии тороида, типа структуры и типа компонентов ПКМ с учетом конструктивно-технологических ограничений при изготовлении тороидального ПК методом намотки, что позволит сформировать рациональную структуру стенки корпуса из ПКМ для обеспечения его максимума несущей способности и минимума массы.

5.4 Выводы по разделу

1. Впервые получены новые данные о влиянии сочетания проектных параметров (технологических, физико-механических, геометрии корпуса) на массогабаритные характеристики тороидальных прочных корпусов из ПКМ при ограничении по верхнему критическому давлению. Выявлены резервы снижения массы тороидального прочного корпуса за счет формования его методом намотки из высокомодульных высокопрочных волокон. Практический

интерес с точки зрения массогабаритных показателей представляют тороидальные прочные корпуса с $0,1 < k < 0,25 \dots 0,33$.

2. Разработан расчетно-аналитический алгоритм для проектирования и выбора рациональных проектных параметров тороидального корпуса. Ограничения по прочности приняты в виде критерия Мизеса-Хилла, а по устойчивости – по верхнему критическому давлению.

3. Выполнена оценка технико-экономической эффективности применения высокопрочных материалов для тороидального прочного корпуса с учетом их стоимости и жесткости. Показано, что стоимость тороидального корпуса из УП с $E_{УВ} = 343$ ГПа в $\sim 1,3$ раза больше стоимости корпуса из СП. Но с увеличением рабочей глубины погружения без увеличения модуля упругости стекловолокон СП неэффективен из-за необходимости увеличения толщины оболочки, а при толщине стенки намотанного изделия свыше 80 мм трудно обеспечить стабильность прочностных свойств готового изделия. Эпоксипластик на основе средних по модулю высокопрочных углеродных волокон ($E_{УВ} = 275 \dots 345$ ГПа, прочность на растяжение – 4500...7000 МПа) наиболее подходит для тороидальных прочных корпусов глубоководной техники.

Результаты данного раздела опубликованы в работах [153, 155, 159, 160].

ВЫВОДЫ

Диссертационная работа, посвященная решению актуального научно-технического задания – созданию концепции проектирования тороидальных корпусов минимальной массы из композиционных материалов с учетом технологии их изготовления методом намотки для перспективных подводных аппаратов в комплексе совместного решения задач прочности и устойчивости при гидростатическом сжатии, позволяет сделать следующие выводы:

1. Конструирование и изготовление прочных корпусов для подводных аппаратов и конструкций является одной из проблем освоения больших глубин океана. Поиск новых форм прочных корпусов, внедрение новых конструкционных материалов и технологий изготовления из них корпусов, которые обеспечивали бы минимум массы корпуса и максимум его несущей способности при действии внешнего гидростатического давления, остаются актуальными в подводном судостроении. Поэтому проблема проектирования прочных корпусов в форме тороида из легких полимерных композиционных материалов, как перспективной формы для подводных аппаратов, актуальна и нуждается в создании теоретического обеспечения для их проектирования, которое будет включать комплексный подход при решении противоречивых требований прочности, устойчивости, технологичности и минимума массы.

2. Впервые усовершенствована математическая модель потери устойчивости тороидального прочного корпуса под действием внешнего гидростатического давления, которая построена на базе геометрически линейной теории слоистых ортотропных оболочек с учетом, в отличие от существующих моделей, конструктивно-технологических особенностей формования тороида методом намотки из полимерных композиционных материалов, а именно: переменность толщины корпуса и дискретная структура стенки из композиционного материала.

3. Впервые на основе усовершенствованной математической модели потери устойчивости получено аналитическое решение задачи устойчивости

тороидального прочного корпуса при гидростатическом сжатии, которое позволяет прогнозировать величину верхнего критического давления, учитывая геометрию тороида, свойства компонентов ПКМ, схему армирования и переменность толщины, как результат формообразования корпуса методом намотки.

4. Дополнительно получены научные данные о влиянии схемы армирования, геометрических параметров корпуса, перспективных типов армирующих наполнителей и связывающих, переменности толщины и ее осреднения в намотанном тороидальном корпусе на величину верхнего критического давления, используя анализ упругих характеристик слоистого композиционного материала. Результаты параметрических исследований представлены в виде графиков зависимости величины верхнего критического давления от указанных характеристик. Установлено, что замена расчета тороидальной оболочки со структурой слоистого материала со слоями переменной толщины на оболочку с осредненной постоянной толщиной слоев вдоль поперечного сечения приводит к завышению величины верхнего критического давления до 40% в пределах исследованных диапазонов проектных параметров.

5. Разработана расчетно-аналитическая методика проектирования тороидального прочного корпуса, изготавливаемого методом намотки из волокнистых полимерных композиционных материалов, при ограничении по прочности и устойчивости и в зависимости от глубины эксплуатации, которая позволит сделать рациональный выбор проектных параметров, а именно: связующих, однонаправленных наполнителей, схем армирования и геометрии тороида.

6. Разработаны рекомендации относительно рационального проектирования тороидальных прочных корпусов при ограничении по прочности и общей устойчивости в зависимости от глубины эксплуатации, которые могут быть использованы в проектно-конструкторских и научно-исследовательских организациях для обоснования выбора проектных

параметров композитных корпусов для подводной техники и конструкций. Для тороидальных прочных корпусов глубоководной техники наиболее подходит эпоксипластик на основе средних по модулю высокопрочных углеродных волокон ($E_B = 275 \dots 345$ ГПа, прочность на растяжение – 4500...7000).

7. Запатентована новая конструктивная схема подводного судна типа «ныряющее блюдо».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Минаков, Н. М. Актуальные задачи и роль подводной техники при проведении научно-исследовательских, подводно-технических и поисково-спасательных работ на море [Текст] / Н.М. Минаков // Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2011. – С. 26 – 30.
2. Шостак, В. П. Подводные аппараты-роботы и их манипуляторы [Текст]: монография / В. П. Шостак. – Чикаго : Мегатрон, 2011. - 134 с.
3. Войтов, Д. В. Подводные обитаемые аппараты [Текст] / Д.В. Войтов. – М.: ООО «Издательство АСТ»: ООО «Издательство Астрель», 2002. – 303 с.
4. Боженков, Ю. А. Самоходные необитаемые подводные аппараты [Текст] / Ю. А. Боженков, А. П. Борков, В. М. Гаврилов ; под общ. ред. И. Б. Иконникова. – Л. : Судостроение, 1986. – 264 с.
5. Диомидов, М. Н., Дмитриев А.Н. Подводные аппараты (проектирование и конструкция) [Текст] / М.Н. Диомидов – Л.: Судостроение, 1966. – 364 с.
6. Дмитриев, А. Н. Проектирование подводных аппаратов [Текст] / А.Н. Дмитриев. – Л.: Судостроение, 1978. – 235 с.
7. Durbin, Ph. Deep Dive [Text] / Ph. Durbin, M. Durbin // Ansys advantage. – 2012. – Vol. VI, Issue 3. – pp. 41 – 44.
8. Pat. 2026951 Great Britain , МКИ В63В 3/13. Underwater hulls or tanks [Text] / Santi; Giunio G. (Italy, IT) – №7915212; filled 2.05.1979; published 13.02.1980.
9. А.с. 1048647 РФ, МПК 5 В 63 В3/13. Корпус глубоководного аппарата [Текст] / Ю.А. Пятницкий, Э.В. Ганов. – № 3415435/11, заявл. 23.03.1982, опубл. 15.04.1994.

10. Pat. 04043190A Japan, МКИ В63G 8/00. Large-sized submersible vessel [Text] / Baba Eiichi (Mitsubishi Heavy Ind LTD) - № 02150698; filled 08.06.1990; published 13.02.1992. – 1 p.

11. Патент на корисну модель № 78215, Україна, ММК (2013.01) В63G8/00. Підводне судно типу «пірнаюче блюдо» підвищеної маневреності / Є.Т. Бурдун, А. В. Крептюк; Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова. № U 2012 10913; заявл. 18.09.2012; опубл. 11.03.2013// Промислова власність, 2013. – Бюл. № 5.

12. Energy systems of extended endurance in the 1-100 kilowatt range for undersea applications: a report National Research Council (U.S.). Committee on Undersea Warfare. Panel on Energy Sources National Academies, 1968. – 132 p.

13. Concept Design for a Manned Underwater Station [Text] / Defense Technical Information Center, 1967. – 234 p.

14. Prescott, Alan I. Ocean Engineering Research Advances [Text] / Alan I. Prescott. – Nova Publishers, 2008. – 334 p.

15. Pat. 3709307 USA, E 21B 15/02. Underwater drilling and production vessel [Text] / Ernest E. Clark, assignee Phillips Petroleum Company. – № 78118; filled 5.10.1970; published 9.01.1973. – 9 p.

16. Ross, C.T. F. Pressure vessels; external pressure technology [Text] / Carl T. F. Ross. - 2d ed. – UK: Woodhead Publishing, 2011. – 488 p.

17. Ross, C.T.F. Exploiting the Deep Oceans for Energy Resources and for Reducing the Effects of Climatic Change [Text] / C.T.F. Ross // J. of Ocean Technology. – 2007. – Vol. 2, No. 2. – pp. 76–84.

18. Ross, C. T. F. Design of Submarine Pressure Hulls under External Hydrostatic Pressure [Text] / C.T.F. Ross, T. Whittaker, A.P.F. Little // Proceedings of the Tenth International Conference on Computational Structures Technology, Valencia, Spain. B.H.V. Topping, J.M. Adam, F.J. Pallarés, R. Bru and M.L. Romero (Eds). – Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, 2010. – Paper 311.

19. Design of an Underwater Drilling Rig [Text] / C.T.F. Ross, R. J. Rodriguez-McCullough, A.P.F. Little, M. El-Hajj // Proceedings of the

Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. B.H.V. Topping, Y. Tsompanakis (Eds). – Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, 2011. – Paper 158.

20. Ross, C. T. F. A Conceptual Design of an Underwater Missile Launcher [Text] / C.T.F. Ross // Ocean Engineering. – 2005. – Vol. 32. – pp. 85–99.

21. Ross, C. T. F. Design of Submarines [Text] / C. T. F. Ross. – University of Portsmouth, U. K. – 2000.

22. Pat. 4282823 USA, B63G 8/00. Underwater hull or tank [Text] / Giunio G. Santi; assignee S.S.O.S. Sub Sea Oil Services S.p.A., Milan, Italy. – №62064; filled 30.07.1979; published 11.08.1981. – 5 p.

23. Крептюк, А. В. Перспективы метода намотки как способа создания прочных корпусов подводных конструкций и аппаратов [Текст] / А.В. Крептюк // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. – 2012. – №4. – С. 133 – 148.

24. Бурдун, Е. Т. Направления развития в проектировании прочных корпусов из композиционных материалов подводных аппаратов и конструкций [Текст] / Е.Т. Бурдун, А.В. Крептюк // Підводна техніка і технологія : І Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю. – Миколаїв : НУК, 2012.

25. Blachut, J. Composite Toroidal Pressure Hull [Text] / J. Blachut, B.H.V. Topping, Z. Bittnar // Proceedings of the Sixth International Conference on Computational Structures Technology. – Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, 2002. – Paper 131.

26. Pat. US 3413947 A, IPC B 63 C 11/00. Submarine craft [Text]/ Jacques Picard, Institut Francais du Petrole des Carburants et Lubrifiants (Rueil-Malmaison, France). – №633732; filed 26.04.1966; published 3.12.1968. – 7 p.

27. Pat. US 04004429, IPC E 02 D 29/00. Deep underwater sphere [Text]/ Mouton Jr., William J. (Metairie, LA). – №5/466045; filed 1.05.1974; published 25.01.1977. – 6 p.

28. Design of the Atlantis II Hull [Electronic resource] – Mode of access: <http://web.mit.edu/12.000/www/m2005/a2/finalwebsite/equipment/habitat/hab-shell.shtml>

29. Deep Water: The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling : Final Report of the National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill. – 2011. – 392 p.

30. Pat. 7703534 USA, E21B 7/12 (20060101). Underwater seafloor drilling rig [Text] / Sheshtawy; Adel (Houston, TX). – № 11/583562; filed 19.10.2006; published 27.04.2010. – 10 p.

31. Будущее энергетики – замороженный газ [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://nederland.ru/se/news/index.php?action=show&nid=2490> (13.07.2005). – Заглавие с экрана.

32. Khairul Izman Abdul Rahim. Conceptual design of a pressure hull for an underwater pole inspection robot [Text] / Khairul Izman Abdul Rahim, Abdul Rahim Othman, Mohd Rizal Arshad // Indian Journal of Marine Science (IJMS). – 2009. – Vol.38(3). – pp. 352 – 358.

33. Bibin, John, Update on Syntactic Foams [Text] / John Bibin, C. P. Reghunadhan Nair. – iSmithers Rapra Publishing, 2010. – 123 p.

34. Копійка, С. В. Прогнозування міцності та ресурсу роботи конструкцій плавучості підводних апаратів [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05. 08. 03 / Копійка Сергій Васильович. – Миколаїв, НУК, 2008. – 232 с.

35. The Nereus Hybrid Underwater Robotic Vehicle for Global Ocean Science Operations to 11,000m Depth [Text] / [A.D. Bowen, D.R. Yoerger, C. Taylor et al.]/ In Proceedings of IEEE/MTS Oceans 2008, Quebec, September 17, 2008. – Dept. of Appl. Ocean Phys. & Eng., Woods Hole Oceanogr. Instn., Woods Hole, MA. – pp. 1 – 10.

36. Mechanics of composite materials and structures [Text] / Ed. by Carlos A. Mota Soares, Cristóvão M. Mota Soares,. Manuel J. M. Freitas. - Springer, 1999. – 517 p.

37. Graphite-Fiber-Reinforced Plastic Pressure Hull Mod 2 for the Advanced Unmanned Search System (AUSS) [Text]: NOSC technical Report 1245 / J.D. Stachiw, B. Frame. – San Diego, CA, Aug. 1988. – 232 p.

38. Соломенко, Н. С. Строительная механика подводных лодок [Текст] / Н.С.Соломенко, Ю.Н. Румянцев. – Издание Высшего Морского Инженерного ордена Ленина училища им. Ф. Э. Дзержинского, Ленинград, 1962. – 396 с.

39. Корабли плывут в будущее [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.sudno1.ru/future.shtml>

40. Griffiths, G. Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles, Vol. 2 [Text] / G. Griffiths. – Abingdon, UK, Taylor & Francis, 2002. – 372 p.

41. Zimmerman, S. Submarine Technology for the 21st Century [Text] / S. Zimmerman. – Trafford Publishing, 2000. – 230 p.

42. Cardon, A. H. Durability Analysis of Structural Composite Systems: Reliability, Risk Analysis and Prediction of Safe Residual Integrity [Text] / Albert H. Cardon. - Taylor & Francis. – 1996. – 190 p.

43. On Lightweight Design of Submarine Pressure Hulls [Text] : Report no EM 2012.021 / Department of Precision and Microsystems Engineering ; A. Van Keulen; S. I. Wong. – 2012. – 181 p.

44. Peters, S. T. Handbook of Composites [Text] / Edited by S.T. Peters. – 2d ed. – London: Chapman & Hall, 1998. – 1120 p.

45. Graham, D. Composite pressure hulls for deep ocean submersibles [Text]/ D. Graham // Composite Structures. – 1995. – Vol. 32. – pp. 335 – 343.

46. Burcher, Roy. Concepts in Submarine Design [Text] / Roy Burcher, L. J. Rydill. – Cambridge University Press CUP, 1995. – 316 p.

47. Carbon fiber market: Gathering momentum [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.compositesworld.com/articles/carbon-fiber-market-gathering-momentum>

48. Campbell, F. C. Structural composite materials [Text] / F. C. Campbell. – Materials Park, Ohio : ASM International, 2010. – 612 p.

49.Бобович, Б. Б. Неметаллические конструкционные материалы: учебное пособие [Текст] / Б.Б. Бобович. – М.: МГИУ, 2009. – 383 с.

50.Мелешко, А. И. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты [Текст] / А.И.Мелешко, С.П. Половников. – М.: Сайнс-Пресс, 2007. – 192 с.

51. Воробей, В. В. Основы технологии и проектирования корпусов ракетных двигателей [Текст] / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск: Наука, 2003. – 164 с.

52. Composite materials in subsea structures [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.materialstoday.com/composite-applications/news/composite-materials-in-subsea-structures/>

53. Комков, М.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения [Текст]: учеб. пособие / М.А. Комков, В.А. Тарасов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 с.

54.Peters, S. T. Composite Filament Winding [Text] / Edited by S.T. Peters. – ASM International, 2011 – 167 p.

55. Росато, Д. В. Намотка стеклонитью: Развитие метода, производство, области применения и конструирование [Текст] / Д.В. Росато; К.С. Грове. – М.: Машиностроение, 1969. – 310 с.

56. Quinn, J. A. Composites-Design Manual (Ed. 4) [Text] / J. A. Quinn. – James Quinn Associates Ltd, 2007. – 176 p.

57. Комков, М. А. Определение конструктивно-технологических параметров оболочек, намотанных из композиционных материалов [Текст] : Учебное пособие / М. А. Комков, И. М. Буланов. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1992. – 83 с.

58. Комков, М. А. Анализ конструктивно-массового совершенства оболочек сосудов давления [Текст] / М. А. Комков, В. А. Тарасов, О. В. Зарубина // Известия вузов "Машиностроение". – 2012. – № 3. – С. 11 – 18.

59. Zu, L. Design and optimization of filament wound composite pressure vessels [Text]: proefschrift / Lei Zu. - Xi'an University of Technology, Xi'an, China, 2012. – 292 p.

60. Li, S. An Analysis of Filament Overwound Toroidal Pressure Vessels and Optimum Design of Such Structures [Text] / S. Li, J. Cook // J. Pressure Vessel Technol. – May 2002. – Vol. 124, issue 2. – pp. 215 – 222.

61. Zu, Lei. Stability of fiber trajectories for winding toroidal pressure vessels [Text] / Lei Zu // Composite Structures. – April, 2012. – Vol. 94, issue 5. – pp. 1855 – 1860.

62. Zu, Lei. Integral design and simulation of composite toroidal hydrogen storage tanks [Text] / Lei Zu, Dinghua Zhang, Yingqiang Xu, Dongjuan Xiao // International Journal of Hydrogen Energy. – January, 2012. – Vol. 37, issue 1. – pp. 1027 – 1036.

63. Submersibles and Technology [Electronic resource] – Mode of access: <http://deepflight.com/subs/index.htm> (5.10.2012). – Заглавие с экрана.

64. Pope, G. T. Deep Flight [Text] / G. T. Pope // Popular Mechanics. – April 1990. – Vol. 167, № 4. – pp. 70 – 72.

65. Typical Properties of Grafil Carbon Fiber [Electronic resource] – Mode of access: <http://grafil.com/grafilproducts.html> (10.02.2013). – Заглавие с экрана.

66. Black, S. Deepsea submersible incorporates composite pressure capsule [Text] / S. Black // High-Performance Composites. – September 2010. – pp. 52 – 53.

67. Walsh, D. Flying Underwater [Text] / D. Walsh // Oceans. – 2009. – Vol. 135/7/1,277. – P. 166.

68. AUV System Spec Sheet [Electronic resource] – Mode of access: <http://auvac.org/platforms/view/138> (5.10.2012). – Заглавие с экрана.

69. Uhrich, R. W. Supervisory Control of Untethered Undersea Systems: A New Paradigm Verified [Text] / R. W. Uhrich, J. M. Walton // Proc. of the 9th UUST. – Durham, NH. – September 25 – 27, 1995. – pp. 1 – 6.

70. Walton, J. M. 114 Untethered UUV Dives: Lessons Learned [Text] / J. M. Walton, R. W. Uhrich // MTS/IEEE Oceans95. – San Diego, CA. – October 10 – 12, 1995.

71. Advanced unmanned search system (AUSS) Description: technical report № 1528/ H. V. Jones. – San Diego: NCCOSC, 1992. – 35 p.

72. Undersea Vehicles and National Needs: Committee on Undersea Vehicles and National Needs [Text] / National Research Council. – Washington, D.C.: National Academy Press, 1996. – 101 p.

73. Osse, T. J. Composite Pressure Hulls for Autonomous Underwater Vehicles [Text] / T. J. Osse, T. J. Lee // Proceedings of IEEE OCEANS 2007. – IEEE Press, New York. – Sept. 29 2007 – Oct. 4 2007. – pp. 1 – 14.

74. Osse, T. J. The Deepglider: A Full Ocean Depth Glider for Oceanographic Research [Text] / T. J. Osse, C.C. Eriksen // Proceedings of IEEE OCEANS 2007. – IEEE Press, New York. – Sept. 29 2007-Oct. 4 2007. – pp. 1 – 12.

75. Undersea gliders [Text] / [G. Griffiths, C. P. Jones, J. Ferguson, N. Bose] // Journal of Ocean Technology. – 2007. – 2 (2) – pp. 64 – 75.

76. Inzartsev, A. V. Underwater Vehicles [Text] / Ed. A. V. Inzartsev. - Florida Institute of Technology : InTech, 2009. – 582 p.

77. LR5 Submersible Submarine Rescue Vessel, United Kingdom [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.naval-technology.com/projects/lr5/> (10.02.2013). – Заглавие с экрана.

78. REACH: A submerged remote sensing reconnaissance system [Text] / [C.A. Prins, N. Versteeg, P.C. Breen et al.]. – DUKC, 2008. – 16 p.

79. Hornfeld, W. DeepC: The New Deep Water AUV Generation [Text] / W. Hornfeld // Proceedings of OMAE03 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Paper No. OMAE2003-37358. – Cancun, Mexico. – June 8 – 13, 2003. – pp. 713 – 721.

80. Cyclops 3000 Submersible [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.oceangate.com/capabilities/cyclops-3000.html>.

81. Крептюк, А. В. Некоторые аспекты интеграции разъемных соединений в композитные прочные корпуса подводных технических средств освоения океана [Электронный ресурс] / А. В. Крептюк // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Всеукраїнська науково-технічна конференція, Миколаїв, 21.05.2014 – 23.05.2014. – Миколаїв: НУК, 2014. – Режим доступа: <http://conference.nuos.edu.ua>.

82. Reliable Design and Fabrication of Composite High Performance Marine Structures [Text] / [J. J. Kelly, G. F. Leon, J. C. Hall, C. Woodall] // Proceedings of the Tenth International Conference on Composite Materials: Microstructure, degradation, and design, Whistler, B. C., Canada, August 1995.

83. Machnig, O. Uber die Stabilitat von torusformigen Schalen [Text] / O. Machnig // Techn. Mitt. Krupp, Essen. – 1963. – B. 21, N. 4. – S. 105 – 111.

84. Machnig, O. Uber Stabilitatsprobleme von torusformigen Schalen [Text] / O. Machnig // Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule fur Verkehrswesen Dresden. – 4, 1956, HEFT 2/3. – pp. 179 – 204.

85. Нетребко, А. В. Устойчивость тороидальных панелей и оболочек [Текст]: дис. канд. техн. наук: 01.02.04 / Нетребко Алексей Васильевич. – М., 1984. – 126 с.

86. Джордан, П. Потеря устойчивости тороидальных оболочек под действием гидростатического давления [Текст] / П. Джордан // Ракетная техника и космонавтика (перевод с англ.). – 1973. – Т. 11, № 10. – с. 104 – 106.

87. Соубл, Л. Устойчивость тороидальной оболочки, нагруженной постоянным внешним давлением [Текст] / Л. Соубл, В. Флюгге // Ракетная техника и космонавтика (перевод с англ.). – 1967. – Т. 5, № 3. – С. 51 – 58.

88. Bushnell, D. Symmetric and nonsymmetric buckling of finitely deformed essentially stiffened shells of revolution [Text] / D. Bushnell // AIAA Journal. – 1967. – V. 5. – pp. 1455 – 1462.

89. Bushnell, D. Nonlinear axisymmetric behavior of shells of revolution [Text] / D. Bushnell // AIAA Journal. – 1967. – V. 5. – pp. 432 – 439.

90. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем [Текст] / А.С. Вольмир. – М.: Физматгиз, 1967. – 984 с.

91. Кошелева, Т. И. Об устойчивости тороидальной оболочки [Текст] / Т. И. Кошелева // Прикладная механика. – 1967. – Т. 3, № 1. – С. 55 – 61.

92. Кошелева, Т. И. Устойчивость моментного состояния тороидальной оболочки [Текст] / Т. И. Кошелева, А.Н. Фролов // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1973. – № 3. – С. 129 – 133.

93. Федосов, Ю. А. Об устойчивости тороидальной оболочки при внешнем давлении [Текст] / Ю. А. Федосов // Известия вузов. Авиационная техника. – 1971. – № 3. – С. 108 – 111.

94. Федосов, Ю. А. Об устойчивости тороидальных оболочек и панелей при внешнем давлении [Текст] / Ю. А. Федосов // Тематический сборник научных трудов МАИ. – 1979. – № 491. – С. 31 – 36.

95. Федосов, Ю. А. Об уточненном решении задачи устойчивости тороидальных оболочек [Текст] / Ю. А. Федосов // Сб. Расчеты на прочность. Машиностроение. – 1976. - № 17. – С. 243 – 248.

96. Федосов, Ю. А. Теоретическое и экспериментальное исследование устойчивости тороидальных оболочек при внешнем давлении [Текст] / Ю. А. Федосов // Известия вузов. Авиационная техника. – 1977. – № 4. – С. 98 – 102.

97. Федосов, Ю. А. Устойчивость замкнутой тороидальной оболочки кругового поперечного сечения [Текст] / Ю. А. Федосов // Сб. Гидроаэромеханика и теория упругости. – Харьков, 1968. – № 7. – С. 94 – 100.

98. Федосов, Ю. А. Экспериментальное исследование устойчивости тороидальных оболочек [Текст] / Ю. А. Федосов // Известия вузов. Авиационная техника. – 1969. – № 3. – С. 154 – 157.

99. Фролов, А. Н. Исследование нелинейного поведения тороидальной оболочки при внешнем давлении [Текст] / А. Н. Фролов, Т.Н. Ходцева // Труды

X Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. – Тбилиси, 1975. – Т. I. – С. 698 – 703.

100. Шаповалов, Л. А. Об одном простейшем варианте уравнений геометрически нелинейной теории тонких оболочек [Текст] / Л. А. Шаповалов // Инженерный журнал. Механика твердого тела. – 1968. – № 1. – С. 56 – 62.

101. Григолюк, Э. И. Устойчивость и колебания трехслойных оболочек [Текст] / Э. И. Григолюк, П. П. Чулков. – М.: Машиностроение, 1973. – 170 с.

102. Гайдайчук, В. В. Ветвление решений нелинейных уравнений тороидальных оболочек при действии внешнего давления [Текст] / В. В. Гайдайчук, Е. А. Гоцуляк, В.И. Гуляев // Прикладная механика. – 1978. – Т. 14, № 9. – С. 38 – 45.

103. Гайдайчук, В. В. Нелинейная устойчивость тороидальных оболочек переменной толщины при действии внешнего давления [Текст] / В. В. Гайдайчук, Е. А. Гоцуляк, В.И. Гуляев // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1978. – № 3. – С. 107 – 113.

104. Расчет оболочек сложной формы [Текст] / [В. И. Гуляев, В. А. Баженов, Е. А. Гоцуляк, В. В. Гайдайчук]. – К.: Будивэльныйк, 1990. – 192 с.

105. Ганеева, М. С. Нелинейный изгиб и устойчивость тонких упругих ортотропных тороидальных оболочек под действием равномерного внешнего давления [Текст] / М. С. Ганеева, Л.А. Косолапова // Прочность и устойчивость оболочек. Тр. Семина. Казан. физ-техн. института, Казань. – 1986. – Вып. 19, Ч.1. – С. 23 – 36.

106. Ганеева, М. С. Численное исследование устойчивости ортотропных тороидальных оболочек переменной толщины [Текст] / М.С. Ганеева, Л. А. Косолапова // Исследования по теории оболочек: Труды семинара, вып. XXI, ч. I. – Казань, 1988. – С. 23 – 36.

107. Ганеева, М. С. Численное исследование напряженно-деформированного состояния и устойчивости ортотропных тороидальных оболочек [Текст] / М. С. Ганеева, Л. А. Косолапова; Академия наук СССР,

Казанский Физико-технический институт. – Казань, 1985. – 26 с. – Деп. в ВИНТИ 29.01.85 г., № 864-85 ДЕП.

108. Вольмир, А. С. Устойчивость тороидальных композитных оболочек [Текст] / А. С. Вольмир, К. З. Хайрнасов // Механика композитных материалов. – 1982. – № 3. – С. 454 – 459.

109. Погосян, Г. С. Об устойчивости тороидальной оболочки из композиционного материала [Текст] / Г. С. Погосян // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1988. – № 4. – С. 33 – 35.

110. Голдманис, М. В. Криволинейный конечный элемент с учетом деформации поперечных сдвигов и обжатия нормали для расчета оболочек вращения [Текст] / М. В. Голдманис; Академия наук ЛатвССР, редколлегия журнала «Механика композитных материалов». – Рига, 1983. – 25 с. – Деп. в ВИНТИ 7.12.83 г., № 6620-83 ДЕП.

111. Włachut, J. On buckling of toroidal shells under external pressure [Text] / J. Włachut, O. R. Jaiswal // Computers and Structures. – 2000. – Vol. 77. – pp. 233 – 251.

112. Włachut, J. Buckling and first ply failure of composite toroidal pressure hull [Text] / J. Włachut // Computers and Structures. – 2004. – Vol. 82. – pp. 1981 – 1992.

113. Лизин, В.Т. Проектирование тонкостенных конструкций [Текст]: Учеб. пособие для студентов вузов. 4-е изд., перераб. и доп. / В.Т. Лизин, В.А. Пяткин. – М.: Машиностроение, 2003. – 448 с.

114. Włachut, J. Collapse Tests on Externally Pressurized Toroids [Text] / J. Włachut // Journal of Pressure Vessel Technology. – 2003. – Vol. 125, Issue 1. – pp. 91 – 96.

115. Светличная, В. Б. Расчет и рациональное проектирование криволинейных труб из армированных пластиков при статическом нагружении [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 01.02.04 / Светличная Виктория Борисовна. – Волгоград, 2005. – 163 с.

116. Лоскутов, Ю. В. Разработка методики расчета многослойных композитных трубопроводов летательных аппаратов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.03 / Лоскутов Юрий Васильевич. – Йошкар-Ола, 2001. – 146с.
117. Калинин, В. А. Намотанные стеклопластики [Текст] / В. А. Калинин, М. С. Макаров. – М.: Химия, 1986. – 272 с.
118. Композиционные материалы [Текст]: Справочник/ Под ред. В.В.Васильева, Ю.М.Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
119. Чан Нгок Тхань. Разработка конструкторско-технологических решений по безоправочной намотке торовых сосудов давления из композитных материалов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Чан Нгок Тхань. – Москва, 2007. – 166 с.
120. Гайдачук В. Е. Уровни дефектов структуры в изделиях из полимерных композиционных материалов, возникающих в процессе их производства / В. Е. Гайдачук, В. А. Коваленко // Авиационно-космическая техника и технология. - 2012. - № 6 (93). - С. 5–12.
121. Ивановский В. С. Технология производства композитного баллона с полимерным лейнером [Текст] / В. С. Ивановский, О. В. Ивановская // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. - 2013. - Вып. 2. - С. 40 – 45.
122. Алфутов, Н. А. Расчёт многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов [Текст] / Н. А. Алфутов., П. А. Зиновьев, Б. Г. Попов. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
123. Ванин, Г. А. Микромеханика композиционных материалов [Текст]/ Г. А. Ванин. – К.: Наук. думка, 1971. – 304 с.
124. Тарнопольский, Ю. М. Особенности расчета деталей из армированных пластиков [Текст] / Ю. М. Тарнопольский, А .В. Розе. – Рига: Зинатне, 1969. – 274 с.
125. Болотин, В. В. Механика многослойных конструкций [Текст] / В. В. Болотин, Ю. Н. Новичков. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.

126. Образцов, И. Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов [Текст] / И. Ф. Образцов, В. В. Васильев, В.А. Бунаков. – М.: Машиностроение, 1977. – 144 с.

127. Carbon Fiber [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.torayca.com/en/index.html>

128. Properties of Filament [Electronic resource] – Mode of access: http://www.tohotenax.com/tenax/en/products/st_property.php

129. Nippon Graphite Fiber Corporation: Granoc Yarn [Electronic resource] – Mode of access: <http://www31.ocn.ne.jp/~ngf/english/product/p1.html>

130. Carbon Fiber [Electronic resource] – Mode of access: http://www.cemselectorguide.com/carbon_fiber.php

131. Pitch-based Carbon Fiber [Electronic resource] – Mode of access: http://www.mpi.co.jp/english/products/industrial_materials/pitch_based_carbon_fiber/pbcf001.html#anc01

132. HexTow® Carbon Fiber - Selector Guide [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.hexcel.com/Resources/SelectorGuides/>

133. Baker, A. A. Composite materials for aircraft structures [Text] / A. Baker, S. Dutton, D. Kelly. – Second Edition (AIAA Education), 2004. - 602 p.

134. Carbon Fiber used in Fiber Reinforced Plastic (FRP) [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.build-on-prince.com/carbon-fiber.html>

135. Материалы на основе высокомодульных высокопрочных стеклянных волокон (НПО "Стеклопластик") [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.npo-stekloplastic.ru/production/fiber-materials/hm-hs-fiber-materials/>

136. Крептюк, А. В. Проектирование и метод расчета устойчивости композитных тороидальных прочных корпусов подводных технических средств, полученных продольно-поперечной намоткой [Текст] / А.В. Крептюк// Проблемы техніки: Науково-виробничий журнал. – 2011. – №2. – С. 113 – 127.

137. Бурдун, Е.Т. Упругие характеристики намоточной тороидальной оболочки [Текст]/ Е.Т. Бурдун, А.В. Крептюк// Методи розв'язання прикладних

задач механіки деформівного твердого тіла: збірник наукових праць Дніпропетр. нац. ун-ту. – 2010. – Вип. 11. – С. 40 – 48.

138. Бурдун Е.Т. Влияние технологических схем намотки тороидальных оболочек на упругие и весовые характеристики [Текст] / Е.Т. Бурдун, А.В. Крептюк// Композиционные материалы в промышленности: материалы 30-й международной научно-практической конференции, Ялта, 7.06 – 11.06 2010 г. – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2010. – С. 427 – 429.

139. Лехницкий, С. Г. Теория упругости анизотропного тела [Текст] / С. Г. Лехницкий. – М.: Наука, 1977. – 416 с.

140. Амбарцумян, С. А. Общая теория анизотропных оболочек [Текст] / С. А. Амбарцумян. – М.: Наука, 1974. – 448 с.

141. Васильев, В. В. Механика конструкций из композиционных материалов [Текст] / В. В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.

142. Черданцев, Н. В. Устойчивость безызгибных судовых оболочек вращения, нагруженных всесторонним равномерным давлением [Текст]: дис. ... канд. техн. наук : 05.08.02 / Черданцев Николай Васильевич. – Л., 1983. – 153 с.

143. Феодосьев, В. И. Проблемы устойчивости в теории оболочек [Текст] / В. И. Феодосьев // Труды VI Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластинок. – М.: Наука, 1966. – С. 951 – 969.

144. Лушпенко, А. В. Устойчивость безмоментного состояния замкнутой ортотропной тороидальной оболочки кругового поперечного сечения переменной толщины [Текст]/ А.В. Лушпенко // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2007. – № 2(413) – С. 25 – 34.

145. Бурдун Е.Т. Об осесимметричной форме потери устойчивости прочного тороидального корпуса подводного аппарата, выполненного намоткой [Текст]/ Е.Т. Бурдун, С.П. Гейко, А.В. Лушпенко // Композиционные материалы в промышленности: материалы 26 международной научно-практической конференции, Ялта, 29.05 – 2.06.2006, Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2006. – С. 281 – 282.

146. Strong, A. Brent. Fundamentals Of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications (2nd Edition) [Текст] / A. Brent Strong. – SME, 2008 – 620 p.

147. Бурдун, Е. Т. Оптимизация структуры намоточной тороидальной оболочки при ограничении по устойчивости [Текст] / Е.Т. Бурдун, А. В. Крептюк // Методи розв'язання прикладних задач механіки деформівного твердого тіла: збірник наукових праць Дніпропетр. нац. ун-ту. – 2011. – Вип.12. – С. 24 – 33.

148. Бурдун, Е. Т. Анализ влияния механических свойств и структуры различных материалов на устойчивость тороидальных прочных корпусов при гидростатическом сжатии [Текст] / Е. Т. Бурдун, А. В. Крептюк // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2012. – № 5-6. – С. 17 – 21.

149. Бурдун, Е.Т. Исследование влияния структурной схемы намотки на устойчивость тороидальной оболочки как прочного корпуса [Текст]/ Е.Т. Бурдун, А.В. Крептюк // Композиционные материалы в промышленности: материалы 27 международной научно-практической конференции, Ялта, 28.05 – 1.06.2006, Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2007. – С. 324 – 327.

150. Бурдун, Е. Т. Влияние геометрии, структуры и механических свойств композита на устойчивость тороидального прочного корпуса при гидростатическом сжатии [Текст] / Е.Т. Бурдун, А.В. Крептюк // Актуальні проблеми інженерної механіки: II Міжнародна науково-технічна конференція. – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 64 – 67.

151. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст]/ Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

152. Физические величины [Текст]: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

153. Бурдун, Е. Т. Оценка эффективности применения высокопрочных конструкционных материалов для тороидальных прочных корпусов подводной

техники [Текст]/ Е. Т. Бурдун, А. В. Крептюк // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2013. – № 2. – С. 43 – 48.

154. Карпов, Я. С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов: учебник [Текст] / Я.С. Карпов. - Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2010. – 768 с.

155. Burdun, Y. T. Rational designing of composite toroidal pressure hull for ocean engineering [Text] / Y. T. Burdun, A. V. Kreptiuk // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – Астрахань : АГТУ, 2014. – № 2 (май). – С. 27 – 36.

156. Черных, К. Ф. Расчет торообразных оболочек. Сб. «Исследования по упругости и пластичности», сб. 2 [Текст] / К.Ф. Черных, В.А. Шамина. – Изд. ЛГУ, 1963.

157. Composite Materials in Maritime Structures: Volume 1, Fundamental Aspects: Fundamental Aspects v. 1 (Cambridge Ocean Technology Series) [Text] / Ed. by R. A. Shenoi, J. F. Wellicome. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. – 368 p.

158. Weight and Manufacturability Optimization of Composite Aircraft Components Based on a Genetic Algorithm [Text]/ [V.V. Toropov, R. Jones, T. Willment, M. Funnell] // 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro, 30 May - 03 June 2005, Brazil.

159. Бурдун Е. Т. О расчете тороидальных прочных корпусов для подводных технических средств [Электронный ресурс] / Е.Т. Бурдун, А.В. Крептюк // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: V Міжнародна науково-технічна конференція, 08.10.2014 - 10.10.2014: тези доповідей. – Миколаїв: НУК, 2014. – Режим доступа: <http://conference.nuos.edu.ua>.

160. Бурдун Е. Т. О конструктивной и весовой эффективности корпуса в форме тора для подводных технических средств освоения океана [Текст] / Е.Т. Бурдун, А.В. Крептюк // Підводна техніка і технологія : Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю, 05.11.2014 – 07.11.2014: тези доповідей. – Миколаїв: НУК, 2014. – С. 19 – 21.

161. Греков, В. М. Оценка технико-экономической эффективности применения высокопрочных материалов для корпусов подводной техники [Текст] / В. М. Греков, Б. В. Дружиловский, В. М. Рябов // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. – Санкт-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. – № 56 (340). – С. 187 – 194.

Приложение А

Методика разработки схемы армирования прочного тороидального корпуса из полимерных композиционных материалов с позиции потери устойчивости

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Национальный университет кораблестроения
им. адм. Макарова

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе,
доктор технических наук,
профессор

 В.С. Блинцов
“13” сентября 2010г.

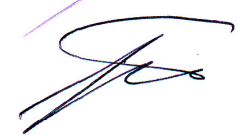
МЕТОДИКА

РАЗРАБОТКИ СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ
ПРОЧНОГО ТОРОИДАЛЬНОГО КОРПУСА
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ПОЗИЦИИ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ
И ПРОЧНОСТИ
№ УКФА. 362111. 001.М - 2010

Начальник НИЧ
канд. техн. наук, доцент


С.С. Рижков

Научный руководитель НПК “КМК”
канд. техн. наук, профессор НУК


Е.Т. Бурдун

2010



1. ОБЪЕКТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

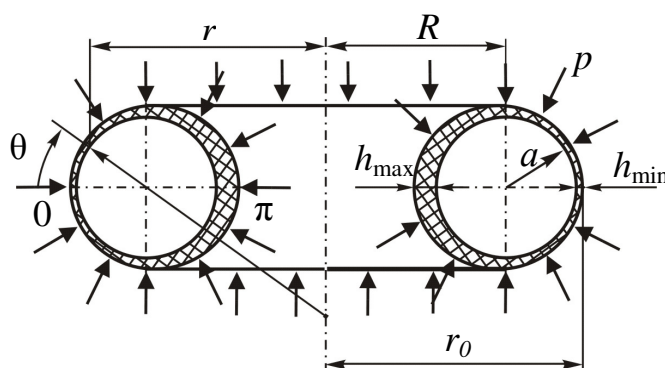
Объектом определения критического давления потери устойчивости и прочности под действием внешнего равномерного давления является тороидальный корпус. Корпус изготавливают методом продольно-поперечной намотки из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Методика предназначена для расчетов тороидальных прочных корпусов, изготавливаемых методом продольно-поперечной намотки из полимерных композиционных материалов, для подводно-технических систем и комплексов, подводных аппаратов.

2. ЦЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Целью является определение верхнего критического давления потери устойчивости (тонкостенного корпуса) и напряжений в стенке при гидростатическом сжатии тороидального корпуса, изготавливаемого методом продольно-поперечной намотки из полимерных композиционных материалов.

3. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Тороидальный корпус представляет собой замкнутую полую тонкостенную тороидальную оболочку кругового поперечного сечения, полученную путем непрерывной намотки волокном или армирующей лентой (см. рис. 1). Корпуса рассматриваются тонкостенными при $h \leq 0,2a$.



a – внутренний радиус сечения меридиана;

R – расстояние от оси вращения до центра меридиального сечения;

r_0 – максимальный радиус вращения;

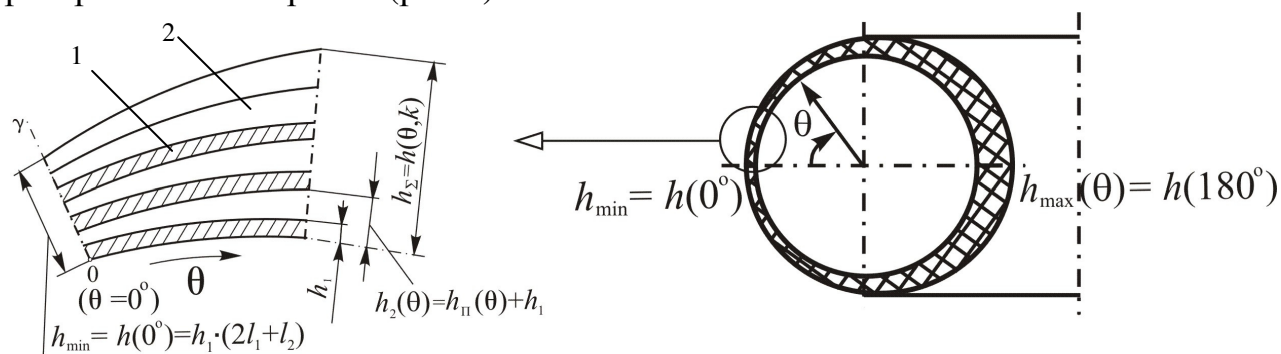
r – расстояние от оси вращения до некоторой точки срединной поверхности;

h_{max} и h_{min} – наибольшая и наименьшая толщины стенки

Рисунок 1 – Геометрические параметры намотанного тороидального прочного корпуса с круговым поперечным сечением:

При продольно-поперечной намотке одна система нитей укладывается в направлении параллели, формируя продольный слой, а другая система нитей – в направлении меридиана, образуя поперечный слой. При данном способе

изготовления формируется стенка переменной толщины из слоистого ортотропного материала (рис.2).



1 –продольный монослой; 2 –поперечный монослой

Рисунок 2 – Расчетная модель слоистой стенки переменной толщины для тороидального корпуса, изготавливаемого продольно-поперечной намоткой:

Основной нагрузкой для тороидального корпуса подводно-технического средства является гидростатическое давление. Исчерпание несущей способности оболочки прочного корпуса при гидростатическом сжатии может произойти для тонкостенной оболочки за счет потери устойчивости ее формы, которая определяется геометрией корпуса и структурой композиционного материала; для более толстых стенок может произойти разрушение материала, когда напряжения в оболочке достигают уровня предельных напряжений на сжатие.

Толщина (масса) намотанного тороидального корпуса, проектируемого по условию устойчивости, зависит от структуры КМ, т.е. от количества и типа различных монослоев, их позиции и ориентации внутри слоистого композиционного материала.

Выбор толщины стенки корпуса из ПКМ базируется на необходимости обеспечения устойчивости, прочности и необходимого уровня безопасности корпуса.

Коэффициент запаса устойчивости f_s для прочного корпуса из неметаллических композиционных материалов должен быть не менее 2.

Полученные толщины стенки корпуса из ПКМ оцениваются с точки зрения конструктивно-технологических ограничений и минимума отношения массы корпуса к его водоизмещению.

Разработанная методика является расчётной и может быть использована на начальных этапах проектирования тороидальных прочных корпусов методом продольно-поперечной намотки из ПКМ для подводных технических средств.

4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходные данные для определения критического уровня давления для тороидального корпуса могут быть получены от производителя компонентов или рассчитаны по приведенным в п. 5 соотношениям.

Исходные данные для расчета распределены по следующим группам.

Конструктивные параметры намотанного тороидального корпуса (см. рис.1):

- внутренний радиус сечения меридиана a ;
- расстояние от оси вращения до центра меридиального сечения R ;
- параметр, характеризующий геометрию тороида, k ;
- толщина продольного монослоя (армирующей ленты) h_1 ;
- количество слоев в пакете, уложенных в направлении параллельного круга, l_1 ;
- количество слоев в пакете, уложенных в направлении меридиана, l_2 ;
- рабочая глубина погружения H_{SW} ;
- коэффициент запаса устойчивости f_s .

Упругие свойства связующего:

- модуль упругости связующего E_M ;
- коэффициент Пуассона связующего μ_M ;

Упругие свойства армирующего материала:

- модуль упругости армирующего материала E_B ;
- коэффициент Пуассона армирующего материала μ_B ;

Упругие свойства монослоя:

- модуль упругости однонаправленно армированного слоя в направлении армирования E_{1M} ;
- модуль упругости однонаправленно армированного слоя поперек армирования E_{2M} ;
- коэффициент Пуассона μ_{12M} ;
- относительное объемное содержание волокон η .

5. РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

5.1. Параметр, характеризующий геометрию тороида:

$$k = \frac{a}{R}$$

5.2. Упругие постоянные монослоя:

$$E_{1M} = E_A \eta + (1 - \eta) \cdot E_I; \quad E_2 \approx \frac{E_A E_I}{\eta \cdot E_I + (1 - \eta) \cdot E_A};$$

$$\mu_{12M} = \mu_A \cdot \eta + (1 - \eta) \cdot \mu_I; \quad \mu_{21M} = \frac{\mu_{12M} E_{2M}}{E_{1M}};$$

$$B_{11} = \frac{E_{1M}}{1 - \mu_{21M} \cdot \mu_{12M}}; \quad B_{22} = \frac{E_{2M}}{1 - \mu_{21M} \cdot \mu_{12M}}; \quad B_{12} = \frac{E_{2M} \cdot \mu_{21M}}{1 - \mu_{21M} \cdot \mu_{12M}} = \frac{E_{1M} \cdot \mu_{12M}}{1 - \mu_{21M} \cdot \mu_{12M}}.$$

6. РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРХНЕГО КРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ ТОРОИДАЛЬНОГО КОРПУСА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОЙ НАМОТКОЙ

Определение верхнего критического давления потери устойчивости тороидального корпуса производится расчётным путём на основании исходных

данных п.4, полученных от производителя свойств компонентов композиционного материала или на основании полученных расчетным путем данных п.5.

6.1. Задать структуру многослойного КМ – количество монослоев с различными углами укладки (намотки), их толщину и позиции в многослойном материале.

6.2. Расчетное внешнее давление, действующее на прочный корпус при погружении, определяется по формуле:

$$q_{sw} = H_{sw} / 100 \text{ [МПа]},$$

где H_{sw} – рабочая глубина погружения, м.

6.3. При нагружении корпуса внешним давлением величина верхнего критического давления упругой потери устойчивости q_v и величина допускаемого по условию устойчивости давления (расчетное внешнее давление) q_{sw} вычисляется по формуле:

$$q_{sw} \leq \frac{q_v}{f_s}, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} q_v = & \frac{k^2}{an^2 \left(1 + \frac{k^2}{4}\right)} \left[\left(\frac{1}{2} R_{13} + R_{17} \right) + \left(\frac{1}{k^2} R_{16} + R_{14} F_2 \right) h_1 (1+k) + \frac{n^2}{a^2} \left[(R_{12} + R_4 + R_8) \frac{1}{2} + \right. \right. \\ & + (R_2 - R_{11}) h_1 (1+k) F_1 + (R_1 - 2(R_5 + R_{10})) h_1^2 (1+k)^2 F_2 + ((R_3 - 7R_9) F_3 + (R_9 - R_7) F_5) h_1^3 (1+k)^3 \Big] + \\ & + \left(\frac{1}{k^2} + \frac{1}{2} \right) R_{15} + \frac{n^4}{a^2 k^2} \left[R_7 h_1^3 (1+k)^3 F_4 + R_5 h_1^2 (1+k)^2 + R_6 h_1 (1+k) + R_8 \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) \right] - \\ & \left. \frac{1}{2} R_{17} + \frac{1}{k^2} \left[R_{15} \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) + R_{16} \cdot h_1 \cdot (1+k) \right] \right] \quad (2) \\ & - n^2 \frac{\left[\frac{1}{2} \cdot (R_{13} - 3R_{17}) + (R_{14} - 3R_{18}) \cdot h_1 \cdot (1+k) \cdot F_1 \right] + \frac{n^2}{k^2} \left[R_{15} \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) + R_{16} \cdot h_1 \cdot (1+k) \right]}{\left[\frac{1}{k^2} \left[R_{15} \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) + R_{16} \cdot h_1 \cdot (1+k) \right] + \frac{1}{2a^2} \cdot (R_4 + R_{12}) + \frac{1}{a^2} (R_2 + R_{11}) h_1 (1+k) \cdot F_1 + \right.} \\ & + \frac{1}{a^2} (R_1 + R_{10}) h_1^2 (1+k)^2 F_2 + \frac{1}{a^2} (R_3 + R_9) h_1^3 (1+k)^3 F_3 + \frac{1}{2} R_{17} + \\ & \left. \left. + \frac{n^2}{a^2 k^2} \left[R_8 \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) + R_6 h_1 (1+k) + R_5 h_1^2 (1+k)^2 + R_7 h_1^3 (1+k)^3 F_4 \right] \right] \right] \times \end{aligned}$$

В формуле (2):

n – количество полуволн потери устойчивости в меридиальном направлении, вычисляемое последовательно для $n = 2, 3 \dots$ до получения минимума q_v ;

$F_\xi(k)$ – функции от k :

$$F_1 = \frac{1}{256} \cdot (128 + 32 \cdot k^2 + 16 \cdot k^4 + 10 \cdot k^6 + 7 \cdot k^8);$$

$$F_2 = \frac{1}{256} \cdot (128 + 96 \cdot k^2 + 80 \cdot k^4 + 70 \cdot k^6 + 63 \cdot k^8);$$

$$F_3 = \frac{1}{256} \cdot (128 + 192 \cdot k^2 + 240 \cdot k^4 + 280 \cdot k^6 + 315 \cdot k^8);$$

$$F_4 = \frac{1}{128} \cdot (128 + 64 \cdot k^2 + 48 \cdot k^4 + 40 \cdot k^6 + 35 \cdot k^8);$$

$$F_5 = \frac{1}{128} \cdot (128 + 192 \cdot k^2 + 240 \cdot k^4 + 560 \cdot k^6 + 315 \cdot k^8);$$

R_f – функции, включающие описание свойств компонентов ПКМ и структуры изготавливаемого методом продольно-поперечной намотки тороидального корпуса ($f = 1, 2 \dots 18$):

$$R_1 = \frac{1}{12} h_1 l_1 [B_{11}(l_1^2 + 3l_2^2) + 2l_1 B_{22}(l_1 + 3l_2) + 2(B_{11} - B_{22})(3l_2 + 1)];$$

$$R_2 = \frac{1}{12} h_1^2 l_1 [2 \cdot B_{11} l_1^2 + B_{22} l_1^2 + 3 \cdot l_2 l_1 B_{22} + 2(B_{22} - B_{11})];$$

$$R_3 = \frac{1}{12} B_{22}(l_2 + l_1)^3; \quad R_4 = \frac{1}{12} B_{11} h_1^3 l_1^3;$$

$$R_5 = \frac{1}{12} h_1 l_1 [l_1^2 (2B_{11} + B_{22}) + 3 \cdot l_2 (2l_1 B_{11} + l_2 B_{22}) + 2(B_{22} - B_{11})(3l_2 + 1)];$$

$$R_6 = \frac{1}{12} h_1^2 l_1 [l_1^2 (B_{11} + 2B_{22}) + 3 \cdot B_{11} l_2 l_1 + 2(B_{11} - B_{22})]; \quad R_7 = \frac{1}{12} B_{11} (l_2 + l_1)^3;$$

$$R_8 = \frac{1}{12} B_{22} h_1^3 l_1^3; \quad R_9 = \frac{1}{12} B_{12} (l_2 + l_1)^3; \quad R_{10} = \frac{3}{12} B_{12} (l_2 + l_1)^2 l_1 h_1;$$

$$R_{11} = \frac{3}{12} B_{12} (l_2 + l_1) l_1^2 h_1^2; \quad R_{12} = \frac{1}{12} B_{12} h_1^3 l_1^3; \quad R_{13} = B_{11} l_1 h_1; \quad R_{14} = B_{22} (l_1 + l_2);$$

$$R_{15} = B_{22} l_1 h_1; \quad R_{16} = B_{11} (l_1 + l_2); \quad R_{17} = B_{12} l_1 h_1; \quad R_{18} = B_{12} (l_1 + l_2);$$

Настоящая методика *может быть использована при* $0 \leq k \leq 0,5$.

6.4. Суммарная толщина пакета слоев, образующих продольно-поперечной намоткой стенку тороидального корпуса:

$$h = h(\theta) = h_1 \cdot \left(l_1 + (l_1 + l_2) \cdot \frac{1+k}{1+k \cdot \cos \theta} \right), \quad (3)$$

где $h_{\text{попер}} = h_1 \frac{1+k}{1+k \cdot \cos \theta}$ – толщина поперечного монослоя.

$$6.5. \text{ Относительная толщина тороидального корпуса: } \Delta = \frac{h}{a}. \quad (4)$$

7. ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТОРОИДАЛЬНОГО КОРПУСА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОЙ НАМОТКОЙ ИЗ ПКМ, ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ ПО ПРОЧНОСТИ

Ограничения по прочности приняты в виде критерия Мизеса-Хилла:

$$|\sigma_{\theta}(\theta)| \leq [\sigma_{\theta c}(\theta)] = \frac{F_{\theta c}}{f_s}; \quad |\sigma_{\psi}(\theta)| \leq [\sigma_{\psi c}(\theta)] = \frac{F_{\psi c}}{f_s};$$

$$\frac{\sigma_{\theta}^2(\theta)}{F_{\theta c}^2} - \frac{\sigma_{\theta}(\theta) \cdot \sigma_{\psi}(\theta)}{F_{\theta c} \cdot F_{\psi c}} + \frac{\sigma_{\psi}^2(\theta)}{F_{\psi c}^2} \leq 1. \quad (5)$$

Для проведения проверочного расчета прочности корпуса по выбранным толщине и структуре ПКМ, удовлетворяющим только требованию обеспечения устойчивости (1), необходимо знать величины действующих напряжений в ламинате (слоистом ПКМ, имеющем форму оболочки) σ_{θ} , σ_{ψ} , предельные напряжения ламината $F_{\theta}(\theta)$ и $F_{\psi}(\theta)$ и выбрать запас прочности (коэффициент безопасности).

Для определения напряжений σ_{θ} , σ_{ψ} в тороидальной оболочке при $k \leq 0,5$, подвергнутой осесимметричному нагружению, используется безмоментное решение Фёппля, согласно которому напряжения от мембранных усилий T_1 , T_2 :

$$\sigma_{\theta}(\theta) = \frac{T_2}{h_{\Sigma}(\theta, k)} = \frac{1 + 0,5 \cdot k \cdot \cos \theta}{1 + k \cdot \cos \theta} \cdot \frac{p \cdot a}{h_{\Sigma}(\theta, k)}; \quad \sigma_{\psi}(\theta) = \frac{T_1}{h_{\Sigma}(\theta, k)} = \frac{p \cdot a}{2 \cdot h_{\Sigma}(\theta, k)},$$

где $h_{\Sigma}(\theta, k)$ – переменная толщина стенки из ламината.

Определение предельных напряжений в ламинате $F_{\theta}(\theta)$ и $F_{\psi}(\theta)$ производится расчётным путём на основании исходных данных п.4, полученных от производителя физико-механических свойств компонентов композиционного материала согласно методики прогнозирования прочности ПКМ, разработанной Я. С. Карповым (Карпов, Я. С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов: учебник [Текст] / Я.С. Карпов. - Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2010. – 768 с.)

Расчет рабочей глубины намотанного тороидального прочного корпуса с позиции потери устойчивости согласно данной методике выполняется с помощью программы Mathcad. Лист табличных вычислений SUBWTOR в формате Mathcad находится в приложении А данной методики.

Приложение А

SUBWTOR - лист табличных вычислений расчета рабочей глубины тороидального корпуса, изготавливаемого методом продольно-поперечной намотки из армированных композиционных материалов, с позиции потери устойчивости для подводных технических средств

Часть 1. - Ввод входных параметров

Рабочая глубина погружения: $H_{SW} := 1000 \text{ м}$ Плотность воды: $\rho := 1027 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

$g := 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

Внутренний радиус сечения меридиана: $a := 1 \text{ м}$

Расстояние от оси вращения до центра меридиального сечения: $R := 3 \text{ м}$

Свойства материалов:

Модуль упругости	Коэффициент Пуассона	Относительное объемное содержание волокон
$E_f := 343 \cdot 10^3 \text{ МПа}$	$\nu_f := 0.31$	
$E_m := 3 \cdot 10^3 \text{ МПа}$	$\nu_m := 0.38$	$\eta := 0.6$

Толщина продольного монослоя (армирующей ленты): $h_1 := 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Количество монослоев в пакете, уложенных в продольном направлении: $l_1 := 83$

Количество монослоев в пакете, уложенных в направлении меридиана: $l_2 := 0$

Часть 2. - Расчетное определение исходных данных

Модуль упругости монослоя в направлении армирования: $E_1 := E_f \cdot \eta + (1 - \eta) \cdot E_m$

Модуль упругости монослоя поперек армирования: $E_2 := \frac{E_f \cdot E_m}{[E_m \cdot \eta + (1 - \eta) \cdot E_f]}$

Коэффициенты Пуассона монослоя: $\nu_1 := \eta \cdot \nu_f + (1 - \eta) \cdot \nu_m$ $\nu_2 := \frac{\nu_1 \cdot E_2}{E_1}$

$E_1 = \blacksquare \text{ МПа}$ $E_2 = \blacksquare \text{ МПа}$ $\nu_1 = \blacksquare$ $\nu_2 = \blacksquare$

$B_1 := \frac{E_1}{1 - \nu_1 \cdot \nu_2}$ $B_2 := \frac{E_2}{1 - \nu_1 \cdot \nu_2}$ $B_{12} := \frac{E_1 \cdot \nu_2}{1 - \nu_1 \cdot \nu_2}$

Параметр, характеризующий геометрию тороида: $k := \frac{a}{R}$
 $k = \blacksquare$

Толщина стенки тороидального корпуса, выполненного продольно-поперечной намоткой:

$$h(\theta) := h_1 \cdot l_1 \cdot \left(1 + \frac{1+k}{1+k \cdot \cos\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right)} \right)$$

$$h(0) = \text{■} \quad \text{М} \quad h(180) = \text{■} \quad \text{М}$$

Относительная толщина тороидального корпуса: $\Delta(\theta) := \frac{h(\theta)}{a}$

$$\Delta(0) = \text{■} \quad \Delta(180) = \text{■}$$

Часть 3. - Расчет общей устойчивости

Коэффициент запаса устойчивости: $f_s := 2$

Расчетное давление: $q_{SW} := \rho \cdot g \cdot H_{SW} \cdot f_s$ $q_{SW} = \text{■}$ Па

Количество полуоволн потери устойчивости в направлении меридиана, вычисляемое последовательно для $n = 2, 3 \dots$ до получения минимума величины верхнего критического давления:

$$n1 := 4$$

Коэффициенты жесткостей через монослои, включающие описание свойств компонентов полимерного композиционного материала и структуры изготавливаемого методом продольно-поперечной намотки тороидального корпуса:

$$R_1 := \frac{1}{12} \cdot h_1 \cdot l_1 \cdot \left[B_1 \cdot (l_1^2 + 3 \cdot l_2^2) + 2 \cdot l_1 \cdot B_2 \cdot (l_1 + 3 \cdot l_2) + 2 \cdot (B_1 - B_2) \cdot (3 \cdot l_2 + l_1) \right] \quad R_3 := \frac{1}{12} \cdot B_2 \cdot (l_2 + l_1)^3$$

$$R_2 := \frac{1}{12} \cdot h_1^2 \cdot l_1 \cdot \left[2 \cdot l_1^2 \cdot B_1 + B_2 \cdot l_1^2 + 3 \cdot B_2 \cdot l_2 \cdot l_1 + 2 \cdot (B_2 - B_1) \right] \quad R_4 := \frac{1}{12} \cdot B_1 \cdot h_1^3 \cdot l_1^3$$

$$R_5 := \frac{1}{12} \cdot h_1 \cdot l_1 \cdot \left[l_1^2 \cdot (2 \cdot B_1 + B_2) + 3 \cdot l_2 \cdot (2 \cdot l_1 \cdot B_1 + l_2 \cdot B_2) + 2 \cdot (3 \cdot l_2 + l_1) \cdot (B_2 - B_1) \right] \quad R_7 := \frac{1}{12} \cdot B_1 \cdot (l_2 + l_1)^3$$

$$R_6 := \frac{1}{12} \cdot h_1^2 \cdot l_1 \cdot \left[l_1^2 \cdot (B_1 + 2 \cdot B_2) + 3 \cdot B_1 \cdot l_2 \cdot l_1 + 2 \cdot (B_1 - B_2) \right] \quad R_8 := \frac{1}{12} \cdot B_2 \cdot h_1^3 \cdot l_1^3$$

$$R_9 := \frac{1}{12} \cdot B_{12} \cdot (l_1 + l_2)^3 \quad R_{10} := \frac{1}{12} \cdot B_{12} \cdot \left[3 \cdot (l_1 + l_2)^2 \right] \cdot (l_1 \cdot h_1) \quad R_{11} := \frac{1}{12} \cdot B_{12} \cdot \left[3 \cdot (l_1 + l_2) \cdot l_1^2 \cdot h_1^2 \right]$$

$$R_{12} := \frac{1}{12} \cdot B_{12} \cdot (l_1^3 \cdot h_1^3) \quad R_{13} := B_1 \cdot l_1 \cdot h_1 \quad R_{15} := B_2 \cdot l_1 \cdot h_1 \quad R_{16} := B_1 \cdot (l_2 + l_1)$$

$$R_{14} := B_2 \cdot (l_2 + l_1) \quad R_{17} := B_{12} \cdot (l_1 \cdot h_1) \quad R_{18} := B_{12} \cdot ((l_2 + l_1)) \quad R_{19} := \frac{1}{2} \cdot l_1 \cdot h_1 \cdot (B_2 - B_1) \cdot (1 + l_2)$$

Коэффициенты, учитывающие переменность толщины в направлении меридиана:

$$F_1 = \frac{1}{256} \cdot (128 + 32 \cdot k^2 + 16 \cdot k^4 + 10 \cdot k^6 + 7 \cdot k^8);$$

$$F_2 = \frac{1}{256} \cdot (128 + 96 \cdot k^2 + 80 \cdot k^4 + 70 \cdot k^6 + 63 \cdot k^8);$$

$$F_3 = \frac{1}{256} \cdot (128 + 192 \cdot k^2 + 240 \cdot k^4 + 280 \cdot k^6 + 315 \cdot k^8);$$

$$F_4 = \frac{1}{128} \cdot (128 + 64 \cdot k^2 + 48 \cdot k^4 + 40 \cdot k^6 + 35 \cdot k^8);$$

$$F_5 = \frac{1}{128} \cdot (128 + 192 \cdot k^2 + 240 \cdot k^4 + 560 \cdot k^6 + 315 \cdot k^8)$$

Верхнее критическое давление:

$$\begin{aligned} q_V = & \frac{k^2}{an^2 \left(1 + \frac{k^2}{4}\right)} \left[\left(\frac{1}{2} R_{13} + R_{17} \right) + \left(\frac{1}{k^2} R_{16} + R_{14} F_2 \right) h_1 (1+k) + \frac{n^2}{a^2} \left[(R_{12} + R_4 + R_8) \frac{1}{2} + \right. \right. \\ & + (R_2 - R_{11}) h_1 (1+k) F_1 + (R_1 - 2(R_5 + R_{10})) h_1^2 (1+k)^2 F_2 + ((R_3 - 7R_9) F_3 + (R_9 - R_7) F_5) h_1^3 (1 \\ & + \left. \left(\frac{1}{k^2} + \frac{1}{2} \right) R_{15} + \frac{n^4}{a^2 k^2} \left[R_7 h_1^3 (1+k)^3 F_4 + R_5 h_1^2 (1+k)^2 + R_6 h_1 (1+k) + R_8 \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) \right] \right] - \\ & - n^2 \frac{\frac{1}{2} R_{17} + \frac{1}{k^2} \left[R_{15} \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) + R_{16} \cdot h_1 \cdot (1+k) \right]}{\left[\frac{1}{2} \cdot (R_{13} - 3R_{17}) + (R_{14} - 3R_{18}) \cdot h_1 \cdot (1+k) \cdot F_1 \right] + \frac{n^2}{k^2} \left[R_{15} \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) + R_{16} \cdot h_1 \cdot (1+k) \right]} \times \\ & \times \left[\frac{1}{k^2} \left[R_{15} \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) + R_{16} \cdot h_1 \cdot (1+k) \right] + \frac{1}{2a^2} \cdot (R_4 + R_{12}) + \frac{1}{a^2} (R_2 + R_{11}) h_1 (1+k) \cdot F_1 + \right. \\ & + \left. \frac{1}{a^2} (R_1 + R_{10}) h_1^2 (1+k)^2 F_2 + \frac{1}{a^2} (R_3 + R_9) h_1^3 (1+k)^3 F_3 + \frac{1}{2} R_{17} + \right. \\ & \left. \left. \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{k^2} + \frac{1}{2} \right) R_{15} + \frac{n^4}{a^2 k^2} \left[R_7 h_1^3 (1+k)^3 F_4 + R_5 h_1^2 (1+k)^2 + R_6 h_1 (1+k) + R_8 \left(1 + \frac{k^2}{2} \right) \right] \right] \right] \right] \end{aligned}$$

Верхнее критическое давление: $q_V = \blacksquare$ МПа

Коэффициент полезного действия: $\gamma_V := \frac{q_V}{q_{SW}}$ $\gamma_V = \blacksquare$

Результаты:

Рабочая глубина погружения: $H_{SW} := 1000 \text{ м}$

Внутренний радиус сечения меридиана: $a := 1 \text{ м}$

Расстояние от оси вращения до центра меридиального сечения : $R := 3 \text{ м}$

Толщина стенки тороидального корпуса на внутреннем экваторе: $h(0) = \blacksquare \text{ м}$

Толщина стенки тороидального корпуса на внешнем экваторе: $h(180) = \blacksquare \text{ м}$

Приложение Б

**ПРИМЕР РАСЧЕТА ТОРОИДАЛЬНОГО КОРПУСА, ИЗГОТАВЛИВАЕМОГО
МЕТОДОМ НАМОТКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ, С ПОЗИЦИИ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ДЕЙСТВИИ
ВНЕШНЕГО РАВНОМЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ**

1. Исходные данные для расчета:

$H_{SW} = 1000$ м; $f_s = 2$; $a = 1$ м; $R = 3$ м; $h_1 = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м; $\eta = 0,6$; $E_B = 343$ ГПа, $\mu_B = 0,31$; $E_M = 3$ ГПа, $\mu_M = 0,38$.

2. Расчет тороидального прочного корпуса, изготавливаемого методом продольно-поперечной намотки из полимерных композиционных материалов, рассматривается как задача с параметрическим перебором вариантов укладки слоев ($l_1 \leq l_2$, l_1, l_2 -var) и поиском минимума величины верхнего критического давления для каждого варианта:

$$k = 0,33;$$

$$q_{SW} = 1000 / 100 = 10 \text{ МПа};$$

$$q_V = 20 \text{ МПа};$$

Для подводного аппарата с рабочей глубиной погружения 1000 м структура стенки тороидального корпуса из углеэпоксипластика с позиции потери устойчивости – $\left[0^\circ / 90^\circ\right]_{83}$ ($l_1 = 83$; $l_2 = 0$).

Суммарная толщина пакета слоев, образующих продольно-поперечной намоткой стенку тороидального корпуса:

$$h = h(\theta) = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 83 \cdot \left(1 + \frac{1 + 0,33}{1 + 0,33 \cdot \cos \theta}\right);$$

$$h = h_{\min} = h(0^\circ) = 0,033 \text{ м};$$

$$h = h_{\max} = h(180^\circ) = 0,05 \text{ м}.$$

Относительная толщина тороидального корпуса:

$$\Delta_{\min} = \frac{h_{\min}}{a} = 0,033;$$

$$\Delta_{\max} = \frac{h_{\max}}{a} = 0,05.$$

Приложение Б

Акты внедрения результатов диссертационной работы



ПАО «ЧЕРНОМОРСУДОПРОЕКТ»
PJSC «CHERNOMORSUDOPROJECT»

54038, Украина, г. Николаев, ул. Бузника, 5

5, Buznika str., Nikolaev, 54038, Ukraine

тел.: +38 0512 70 93 20

м.тел.: +38 067 264 54 44

факс: +38 0512 34 10 60

www.chsp.mksat.net

e-mail: chsp.pjsc@gmail.com

АТ "Райффайзен Банк Аваль"

расч. счет: 26004205489

ЕГРПОУ: 14308782

МФО: 380805

вих. № 07

від «02» 03 2015 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник генерального директора,
кандидат технічних наук,
Д.В. Зайцев
« » 2015 г.



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
«Рациональне проектування тороїдальних корпусів із композиційних матеріалів
для підводних апаратів» на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук
Крептюк А.В.

Ми, що нижче підписалися, технічний директор Панков Володимир Володимирович, начальник КБ-1 Хорошко Світлана Олексіївна склали цей акт про те, що в проектних розробках ПАТ "Чорноморсуднопроект" було використано наступні результати, отримані в дисертаційній роботі:

- методика розрахунку верхнього критичного тиску втрати стійкості при гідростатичному стисканні тороїдального міцного корпусу, виготовленого методом намотування із однонапрямлених композиційних матеріалів (Методика розробки схеми армування міцного тороїдального корпусу з полімерних композиційних матеріалів з позиції втрати стійкості);
- розрахунково-аналітичний алгоритм проектування та вибору раціональних проектних параметрів композитного тороїдального міцного корпусу.

Робота має виражену практичну спрямованість і представляє для підприємства безперечний інтерес, оскільки в суднобудуванні намітилася інтенсивна заміна металевих сплавів на легкі та міцні композиційні матеріали.

Технічний директор

Начальник КБ-1

Панков В.В.
Хорошко С.О.

Панков В.В.

Хорошко С.О.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Ректор НУК

д-р техн. наук, професор

Рижков С.С

“ 11 ” 07 2014 р.

Акт впровадження

результатів розробок кандидатської дисертації Крептюк Антоніни Вікторівни «Рациональне проектування тороїдальних корпусів із композиційних матеріалів для підводних апаратів»
у навчальному процесі в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова

В навчальному процесі підготовки бакалаврів і спеціалістів зі спеціальності «Проектування та виробництво конструкцій із композиційних матеріалів», напрям підготовки 6.051101 – “Авіа – і ракетобудування” використовуються розробки, методики та програмні документи, що розроблені у дисертаційній роботі.

Перелік розроблених документів:

1. Заключний звіт по НДР № 1579 «Розробка методів дослідження і розрахунку нелінійних імовірнісних квазістатичних і динамічних навантажень і деформації корпусів судів в екстремальних штормових умовах (ДР №0106U000829).-2006.Розділ «Розробка методики оптимального проектування міцних ортотропних тороїдальних корпусів змінної товщини для підводних технічних засобів» Том 2, Миколаїв, НУК, 2006, с.43.

2. Заключний звіт по НДР № 1715 «Розробка методів проектування суднових конструкцій із полімерних композиційних матеріалів при статичних і динамічних навантаженнях» (ДР №0109U002221).-2009 -2010. Розділ «Методика розробки схеми армування міцного тороїдального корпусу із полімерних композиційних матеріалів с позицій втрата стійкості УКФА -362111-001С, Миколаїв, НУК, 2010, с.7.

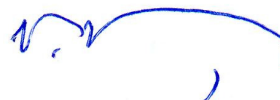
Результати впровадження методик виконання розрахунків і програмних продуктів в навчальний процес для студентів спеціальності «Проектування та виробництво конструкцій із композиційних матеріалів» наведені в таблиці.

Таблиця – Впровадження результатів кандидатської дисертації Крептюк А.В. до навчального процесу

Дисципліни	Тематика лекцій	Практичні заняття	Лабораторні заняття	Курсові роботи, проекти
1. Теорія намотування та устаткування	Методи намотування міцних корпусів підводних апаратів 1, 2*	—	—	—
2. Проектування та конструювання виробів із композиційних матеріалів	“Нормативна та конструкторська документація” 1*	—	—	Проектування міцних корпусів підводних апаратів 1,2*
3. Механіка та міцність композиційних матеріалів	“Механічні властивості КМ” 1,2*	—	Визначення механічних властивостей КМ 1,2*	—

4. Загальне проектування та виробництво суден із композиційних матеріалів	—	—	—	Проектування корпусів суден 1,2*
5. Дипломне проектування	Теми дипломних робіт студентів: Розробка програм змінення натягу при намотуванні оболонок міцних корпусів підводних технічних засобів 1,2*			
* - вказується порядковий номер з «Переліку розроблених документів»				

Голова комісії:
Директор інституту комп'ютерних та
інженерно-технологічних наук
д. т. н., професор



К.В.Кошкін

Члени комісії:
Декан технологічного факультету
к. т. н. доцент



Т.А.Фаріонова

к. т. н. в. о. доцента кафедри
проектування та виробництво
конструкцій із композиційних матеріалів



С. В. Копійка