

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

Романюта Дмитрий Александрович

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ
КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТОВ**

Специальность: 2.5.18 «Проектирование и конструкция судов»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Чуреев Евгений Андреевич,
кандидат технических наук

Калининград
2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТОВ	10
1.1 Обзор требований зарубежных классификационных обществ	10
1.2 Оценка корректности предлагаемого зарубежными классификационными обществами подхода, на примере балок и пластин, работающих на изгиб.....	13
1.3 Выбор объекта проектирования	16
1.4 Вывод по главе 1	17
2 ФОРМИРОВАНИЕ НОВОЙ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТОВ	19
2.1 Алгоритм проектирования	19
2.2 Определение перечня минимальных требований к физико-механическим характеристикам термопластов для отечественных классификационных обществ.	21
2.3 Обоснование и выбор рассматриваемых материалов	28
2.4 Определение минимальных требований к пластинам корпуса и балкам набора	32
2.5 Выбор конститутивной модели материала для выполнения проверочных расчетов прочности.....	38
2.6 Вывод по главе 2	43
3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНСТИТУТИВНОЙ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА	45
3.1 Анализ существующей практики нормирования прочности и жесткости судовых корпусных конструкций из термопластов	45
3.2 Выбор исследуемых свойств термопластов	47
3.3 Исследования свойств термопластов	48
3.4 Определение допускаемых напряжений и перемещений	63
3.5 Определение трехсетевой модели материала.....	67
3.6 Вывод по главе 3	72
4 ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ	74
4.1 Описание расчетного случая.....	74
4.2 Выбор материала конструкции корпуса причала (I этап).....	75
4.3 Определение минимальных размеров связей и предварительное проектирование конструкции корпуса (II этап)	76
4.4 Выполнение проверочных расчетов прочности (III этап)	96

4.5 Выводы по главе 4	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Свидетельства о поверке испытательного оборудования (справочное) .	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Чертеж общего расположения плавучего причала (обязательное).....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Конструкция корпуса плавучего причала (обязательное)	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Обзор требований зарубежных классификационных обществ к физико-механическим свойствам термопластов (обязательное)	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Акты о внедрении (обязательное).....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Пояснительная записка в части актуализации требований Правил Российского Морского Регистра Судоходства по проведению испытаний на ультрафиолетовое старение (обязательное)	132

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В последние десятилетия сектор маломерного и малотоннажного судостроения динамично развивается, о чем свидетельствуют различные источники. К примеру, в таблице 1 представлены прогнозы экспертов по данному рынку до 2034 г.

Таблица 1 – Прогнозируемый мировой рынок малотоннажного судостроения к 2034 году [1]

Тип судна	Объем рынка в 2024 г, млрд. дол.	Объем рынка в 2034 г, млрд. дол.
Прогулочные катера	39,7	70,6
Автономные суда	0,54	1,18
Суда понтонного типа	8,50	17,7
Катамараны	4,70	9,50
Прогулочные суда	46,6	92,8
Палубные катера	2,10	4,00
Надувные лодки	0,81	1,40
Парусные яхты	3,10	4,50

По другим прогнозам, мировой рынок малых судов, в объеме 17,1 миллиардов долларов в 2024 году вырастет до 26,4 миллиардов долларов к 2034 году. При этом ожидается, что наиболее интересными для потребителя окажутся моторные лодки [2].

Подобная динамика рынка малотоннажных судов стимулирует судостроительную отрасль к поиску более совершенных и экономически целесообразных решений в различных направлениях: от освоения безэкипажной системы управления судна, до поиска оптимального основного конструкционного материала (ОКМ) корпуса. В качестве ОКМ для малотоннажных судов широко применяются стали, алюминиевые сплавы, дерево, а также различные полимерные композитные материалы (чаще всего – стеклопластик).

В последнее время наблюдается активное использование термопластов для строительства катеров и прочих судов малых размерений. В качестве таких ОКМ могут использоваться акрилонитрилбутадиенстирол (АБС-пластик), полипропилен (ПП) или полиэтилен (ПЭ). Наиболее востребованным термопластом в данном направлении является полиэтилен низкого давления (ПНД) [3], из которого изготавливается подавляющее большинство судов. Из ПНД изготавливают плавучие объекты, моторные лодки, катера, хаусботы, и другие малотоннажные суда, размерами не более 15-20 метров.

В то же время, промышленности известен такой термопласт, как непластифицированный поливинилхлорид (жесткий ПВХ, НПВХ). Согласно осредненным данным [4, 5], многие характеристики жесткого ПВХ являются лучшими, по сравнению с широко применяемым ПНД,

однако, в настоящее время, НПВХ не используется в качестве ОКМ при строительстве судов не в России, не за рубежом.

В России производством малотоннажных судов из термопластов занимается большое количество небольших предприятий (около 30-40 шт.), большая часть которых располагается в европейской части России. При этом, практически все суда разрабатываются под требования Государственной инспекции по маломерным судам МЧС России (ГИМС МЧС России, ГИМС). Одной из причин такой ситуации является отсутствие Правил Российского морского регистра судоходства (РМРС, РС) или Российского классификационного общества (РКО) по проектированию и классификации судов из термопластов.

На практике, в отечественном судостроении, выбор размеров связей корпуса судна из термопластов осуществляется, чаще всего, «от прототипа», что приводит к завышенной, или к недостаточной прочности и жесткости отдельных элементов корпуса. В иностранной практике выбор размеров связей осуществляется с помощью некоторых полуэмпирических зависимостей, либо с помощью упрощенной модели материала термопласта, без учета его реальных физико-механических характеристик (ФМХ), что приводит к существенным расхождениям между экспериментальными и расчетными показателями, характеризующими напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкций корпуса судна (ККС).

Таким образом, разработка методики проектирования судовых корпусных конструкций (СКК) из термопластов с учетом их реальных ФМХ сможет позволить корректнее определять размеры связей корпуса судна и послужить основой для формирования будущих Правил отечественных классификационных обществ (КО) в части конструкции и прочности судов из термопластов, а исследование возможности применения НПВХ в качестве ОКМ может расширить применение термопластов в ККС в целом.

Степень разработанности темы исследования. Применение НПВХ в качестве основного конструкционного материала рассмотрено G.Rindo, A. Firdhaus, D. Chrismiantob, P. Manik [6-8]; W. Amiruddin, H. Yudo [9]. В рамках данных работ, исследуются небольшие суда и плоты, основным элементом конструкции которых являются ПВХ трубы. Кроме упомянутых, работ по использованию НПВХ в судостроении не обнаружено.

Вопрос применения ПНД в качестве ОКМ в СКК исследован гораздо подробнее. В данном отношении среди отечественных наработок, можно отметить работы А.Г. Назарова и С.А. Королева [10], а также В.В. Гусева [11-13]. Среди исследований зарубежных авторов, следует выделить труды M.Kafali [14], S.S. Cho [15-22], W.D. Aryawan [23, 24], D. Setyawan [24, 25], N. Saputra [26, 27] и других специалистов. Все упомянутые работы посвящены вопросам общего проектирования судна, расчетам мореходных качеств, а также выполнению проверочных расчетов прочности. Вопросы проектирования конструкции корпуса судна в данных работах не

рассмотрены. Проверочные расчеты прочности с помощью метода конечных элементов (МКЭ) выполнены без учета реальных ФМХ материалов.

Методология проектирования ККС из термопластов в наибольшей мере рассмотрена некоторыми членами Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО) – КО Хорватии [28], Норвегии/Германии [29], Индии [30], Турции [31], Франции [32] и Италии [33], однако данные Правила требуют существенных доработок и корректировок по отдельным положениям.

Цель исследования: разработка прикладной методики определения размеров связей судовых корпусных конструкций из термопластичных материалов с учетом их реальных физико-механических характеристик.

Задачи исследования:

1. анализ существующих методик проектирования СКК из термопластов;
2. исследование ФМХ материалов, требующих учета при проектировании ККС;
3. определение критериев прочности и жесткости для проектирования корпусных конструкций;
4. выбор и определение коэффициентов конститутивной модели материала, учитывающей реальные ФМХ термопластов, для выполнения проверочных расчетов прочности;
5. разработка методики выбора размеров связей ККС из термопластов на начальных и последующих этапах проектирования.

Объект исследования: судовые корпусные конструкции из термопластов на примере конструкции плавучего причала.

Предмет исследования: методика определения размеров связей ККС с учетом ФМХ термопластов.

Методология и методы исследования: в диссертационном исследовании использованы классические методы проектирования судовых корпусных конструкций, численные методы расчета прочности, а также экспериментальные исследования.

Научная новизна работы:

1. сформирован перечень ФМХ материалов для возможности рассмотрения термопластов в качестве ОКМ отечественным КО;
2. предложено применение НПВХ в качестве ОКМ для малотоннажных судов и плавучих объектов;
3. уточнены коэффициенты использования прочности (КИП) для определения размеров связей СКК из ПНД на различных этапах проектирования;
4. получены КИП для определения размеров связей СКК из жесткого ПВХ;

5. определены коэффициенты конститутивной модели ПНД для выполнения проверочных расчетов прочности конструкций;

6. предложена методика определения размеров связей ККС из термопластов, на ранних и последующих этапах проектирования.

Теоретическая значимость работы заключается в использовании результатов диссертационного исследования в качестве исходных данных для составления технического задания деятельности рабочей группы «Разработка требований к конструкции и прочности судов малых размерений из полиэтилена низкого давления для включения в Правила РС» для формирования изменений в нормативную документация ФАУ «РМРС».

Практическая значимость работы заключается в разработке алгоритма определения размеров связей ККС из термопластов, как на начальном этапе проектирования, так и на последующих. Разработанная методика учитывает реальные ФМХ материалов, и позволяет оценить изменение НДС СКК, обусловленное как внешними факторами (скорость и температура нагружения), так и внутренними (нелинейная вязкоупругость материала).

Положения, выносимые на защиту:

1. перечень ФМХ термопластов, необходимый для одобрения материала в РС;
2. методика определения размеров связей ККС из термопластов;

Степень достоверности результатов исследования подтверждается:

1. использованием стандартных методик (по ГОСТ) для проведения испытаний в лабораторном комплексе НОЦ СМИТ ФГБОУ ВО «КГТУ»;
2. использованием метрологически поверенного и калиброванного измерительного оборудования при проведении экспериментальных исследований;
3. значительным объемом собранного, обработанного и проанализированного материала, опубликованного в отечественных и зарубежных научных журналах, справочниках и Правилах ведущих мировых КО.

Личный вклад автора в диссертационную работу состоит в:

1. постановке научно-исследовательских задачи и их решении;
2. разработке подхода к определению размеров связей ККС из термопластов на начальных и последующих этапах проектирования;
3. планировании, подготовке и обработке всех экспериментальных исследований;
4. определении коэффициентов определяющих уравнений конститутивной модели ПНД;
5. выполнении проверочных расчетов прочности методом конечных элементов в программных пакетах «Femap with NX Nastran» и «Ansys».

Основные результаты диссертации получены лично автором, либо при его непосредственном участии в роли научного руководителя коллективом молодых ученых.

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследования были представлены на научно-практических конференциях различного уровня:

- XII Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии» в рамках XII Международного Балтийского Морского Форума, Калининград, 2024 г.;

- XIII Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии» в рамках XIII Международного Балтийского Морского Форума, Калининград, 2025 гг.;

- конференция «Новые технологии в судостроении-2024», АО «ЦТСС», Санкт-Петербург, 2024 г.;

- всероссийская научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Научно-технологическое развитие судостроения-2025». ФГУП «КГНЦ», Санкт-Петербург, 2025 г.;

- магистерская конференция «Актуальные вопросы инженерных наук», ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, 2025 г.;

- магистерская конференция «Актуальные вопросы инженерных наук», ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, 2026 г.

Результаты работы также представлены на заседании научно-технического совета РС в рамках секции «Конструкция корпуса, теория корабля, судовые устройства и материалы» 24 марта 2026 года.

Внедрение результатов работы. Отдельные результаты работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «КГТУ» в рамках подготовки кадров по направлению 26.03.02 – «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» и 26.04.02 – «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», о чем также свидетельствует акт.

Кроме того, отдельные результаты исследований одобрены и внедрены ФАУ «Российский Морской Регистр Судоходства» в Правила 2026 года, о чем свидетельствует акт о внедрении.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 3 научные статьи в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Романюта, Д. А. Перспективы использования жесткого поливинилхлорида в малотоннажном судостроении / Д. А. Романюта // Известия КГТУ. – 2024. – № 73. – С. 111-124. – DOI 10.46845/1997-3071-2024-73-111-124. – EDN OVJYVS.

2. Романюта, Д. А. Исследование физико-механических характеристик винипластов для использования в малотоннажном судостроении / Д. А. Романюта, Е. А. Чуреев, А. Г. Кисель //

Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 2-1(68). – С. 15-24. – DOI 10.37220/MIT.2025.68.2.001. – EDN FAZOM.

З. Романюта, Д. А. Обоснование подхода к проектированию конструкции корпуса судна из винипласта / Д. А. Романюта, Е. А. Чуреев // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2026. – № 1(415). – С. 83-94. – EDN GKLWPX.

Соответствие паспорту специальности. Приведенные в диссертации научные положения соответствуют паспорту специальности 2.5.18 «Проектирование и конструкция судов»: п. 4 «Методы и методики проектирования судов, кораблей и других объектов морской техники как сложных технических систем, в том числе обеспечивающие выполнение требований к уровням их физических полей».

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Диссертация содержит 52 таблицы, 72 рисунка, 2 страницы оглавления, список литературы из 90 наименований, а также 6 приложений. Общий объем работы составляет 142 страниц, в том числе приложения на 29 листах.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТОВ

1.1 Обзор требований зарубежных классификационных обществ

Вопрос определения размеров связей СКК из термопластичных материалов, на данный момент, в технической литературе практически не освещен. Подавляющее большинство материалов (как отечественных, так и зарубежных), связанных с вопросами «проектирования судовых конструкций из термопластов» относятся к системам различных трубопроводов [34-36], а вопросы проектирования составных корпусных конструкций не затрагиваются. Ввиду того, что ПНД является наиболее используемым ОКМ из термопластов в судостроении, другие термопласты, используемые в существенно меньшей мере (АБС-пластик и ПП) далее в работе не рассматриваются.

Процедура проектирования СКК из ПЭ не рассмотрена в отечественной практике, однако в этом отношении можно отметить опыт иностранных классификационных обществ (ИКО), в частности, КО Хорватии, Норвегии/Германии, Индии, Турции, Франции и Италии.

1.1.1 Хорватия и Норвегия/Германия

Требования хорватского – Croatian Register of Shipping (CRS) – классификационного общества к проектированию ККС из термопластов изложены в Правилах для классификации судов, длиной менее 24 метров [28]. Требования норвежского/немецкого – Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd (DNV GL) – классификационного общества к проектированию ККС из термопластов изложены в Правилах [29].

Согласно данным Правилам, в качестве ОКМ, рассматривается использование ПЭ и АБС-пластика. Правилами допускается использование двухслойной (внешняя/внутренняя обшивка) и трехслойной (внешняя обшивка/заполнитель/внутренняя обшивка) конструкции корпуса судна.

Требования к проектированию размеров связей из ПЭ, сводятся к двум указаниям:

1. толщина внешней бортовой и днищевой обшивки, t_{out} , мм, из полиэтилена среднего и высокого давления (ПСД и ПВД соответственно) определяется по формуле (1.1):

$$t_{out} = ks \sqrt{\frac{PF}{6,7L}} (14 + 3,6L), \quad (1.1)$$

где s – шпация, м;

L – длина судна, м;

k – коэффициент, принимаемый равным 1,0 для ПВД и 0,85 для ПСД;

PF – коэффициент давления для бортовой или днищевой обшивки (PF_s или PF_b соответственно).

Коэффициенты давления принимаются по рисункам, представленным в Правилах, в зависимости от длины и эксплуатационной скорости судна.

2. толщина внутренней обшивки t_{in} , мм, принимается равной 0,8 от t_{out} .

Представленные требования не позволяют в полной мере спроектировать конструкцию судна даже на начальных этапах проектирования по следующим причинам:

1. определение толщины обшивки не зависит от размера опорного контура, во многом определяющего НДС судовой пластины, что, свидетельствует о том, что формула носит эмпирический характер [10];

2. Правила не рассматривают использование ПНД в качестве ОКМ, несмотря на то что суда из ПСД и ПВД встречаются существенно реже, чем суда из ПНД;

3. отсутствуют какие-либо указания по части проектирования балок набора корпуса и т.д.

1.1.2 Турция и Индия

Требования индийского – Indian Register of Shipping (IRS) – и турецкого – TÜRK LOYDU (TL) – классификационных обществ представлены в Правилах [30] и [31] соответственно.

Проектирование конструкции корпуса судна из ПЭ практически полностью повторяет Правила Хорватии [28] и Норвегии/Германии [29] за некоторыми исключениями:

1. помимо ПСД и ПВД в качестве ОКМ может рассматриваться ПНД. В этом случае, коэффициент « k » в формуле (1.1) должен быть принят равным 0,72;

2. КО требует предоставление прямого расчета размеров связей балок набора, однако, никаких указаний к выполнению подобных расчетов не представлено;

3. турецкое КО допускает расчет толщин обшивки судна, выполненный прямым методом, однако полученные значения толщин не должны быть меньше 80% от толщин, полученных по формуле (1.1). При этом указано, что формула (1.1) носит эмпирический характер, что подтверждает выше изложенные выводы.

Таким образом, представленные в Правилах Турции и Индии требования дополняют требования Правил Хорватии и Норвегии/Германии, но также не позволяют выполнить проектирование ККС из термопластов в полной мере.

1.1.3 Италия

Требования итальянского КО – Registro Italiano Navale (RINA) – представлены в Правилах классификации судов с корпусом из пластмасс, алюминиевых сплавов и дерева [33]. RINA в

качестве ОКМ из термопластов рассматривает только ПНД, при этом вопрос проектирования ККС судна рассмотрен гораздо подробнее.

Согласно п. 2.1.4 раздела 3 главы 4 части В [33], определение размеров элементов конструкции корпуса должно проводиться в соответствии с требованиями к алюминиевым конструкциям, изложенными в главе 2 раздела 3. При этом, коэффициенты запаса прочности для выполнения расчетов принимаются отдельным образом (не по требованиям Правил к алюминиевым конструкциям). Кроме того, согласно п. 2.1.2 раздела 3 главы 4 части В, проверочные расчеты прочности могут производиться в соответствии с [37] для металлических материалов. Категория проектирования не должна превышать категорию «С», а коэффициент запаса, используемый для определения расчетных напряжений, должен составлять 1,5.

В качестве минимальных ограничений, RINA нормирует минимальный момент сопротивления балок набора – 15 см^3 .

Таким образом, итальянское КО при проектировании элементов ККС и выполнении проверочных расчетов прочности предлагает использовать подход, аналогичный подходу для металлических конструкций, т.е. рассматривать ПНД, как изотропный и линейно-упругий материал (по аналогии со сталью и алюминием). Однако, коэффициенты запаса прочности для ПНД должны быть пересчитаны отдельно, с учетом ФМХ материала. Данный подход позволяет в полной мере спроектировать ККС из термопластов как на начальном этапе проектирования, так и при выполнении проверочных расчетов прочности, поскольку в основе используется классические методы сопротивления материалов и строительной механики корабля.

Однако, необходимо отметить, что предлагаемый подход не учитывает многие особенности ФМХ ПНД – ярко выраженные нелинейные вязкоупругие свойства [38-40], влияние скорости нагружения [41, 42] и температуры на [43, 44] на ФМХ материала, потери энергии деформации, возникающие до достижения напряжений, соответствующих появлению пластических деформаций (петли гистерезиса) [41, 45], неодинаковость работы материала при растяжении и сжатии [46] и пр.

1.1.4 Франция

Требования французского КО – Bureau Veritas (BV) – к корпусным конструкциям из термопластов представлены в Правилах [32]. В качестве ОКМ из термопластов, BV рассматривает использование только ПНД.

Проектирование СКК осуществляется, по аналогии с Правилами RINA из условия рассмотрения изотропного и линейно-упругого материала. Допускаемые напряжения, так же, рассчитываются для ПНД отдельно. Из особенностей расчета дополнительно можно отметить:

1. учет эффекта старения материала, который реализован путем введения коэффициента старения равного «1,05» при подборе толщин пластин или моментов сопротивления балок набора. Таким образом, КО учитывает изменение ФМХ материала в период срока службы судна.

2. расширенные требования к выполнению расчётов потери устойчивости пластин из ПНД. Требования к данным расчетам изложены в отдельном приложении 2 [32] и проработаны достаточно подробно, что свидетельствует о повышенном внимании КО к устойчивости пластин из ПНД.

В качестве минимальных ограничений, BV нормирует минимальный момент сопротивления балок набора – 15 см^3 , и минимальную толщину пластин корпуса – 10 мм.

Среди всех рассмотренных методик проектирования ККС из ПНД, требования французского КО являются наиболее проработанными. Однако, как и в требованиях Правил RINA, методика расчета не учитывает особенностей ФМХ материала.

1.2 Оценка корректности предлагаемого зарубежными классификационными обществами подхода, на примере балок и пластин, работающих на изгиб

Среди рассмотренных методик проектирования ККС из термопластов, только методики французского и итальянского КО позволяют выполнить все необходимые расчеты и определить необходимые размеры связей конструктивных элементов. При этом, как было обозначено выше, данные методики основаны на использовании модели изотропного и линейно-упругого материала для выполнения всех необходимых расчетов. Ввиду специфики реальных ФМХ ПНД, возникает вопрос о корректности допущений предлагаемого подхода.

С целью подтверждения возможности использования расчетной модели изотропного и линейно-упругого материала для расчета конструкций из ПНД, выполнен теоретический расчет изгиба балок и пластин, с последующим экспериментальным исследованием выбранных расчетных случаев.

Для расчета балок на изгиб выбрано три расчетных случая: трехточечный изгиб, четырехточечный изгиб и изгиб консольной балки с жесткой заделкой. Изображение расчетных схем и экспериментальных установок представлено на рисунке 1.1.

Экспериментальные исследования изгиба балок выполнены на образцах из листового ПНД, производства компании ООО «Техноком». Листовой ПНД изготовлен из полиэтилена марки HD 03594 PE компании ПАО «Сибур Холдинг». Модуль упругости материала принят равным 967 МПа (см. п. 2.3).

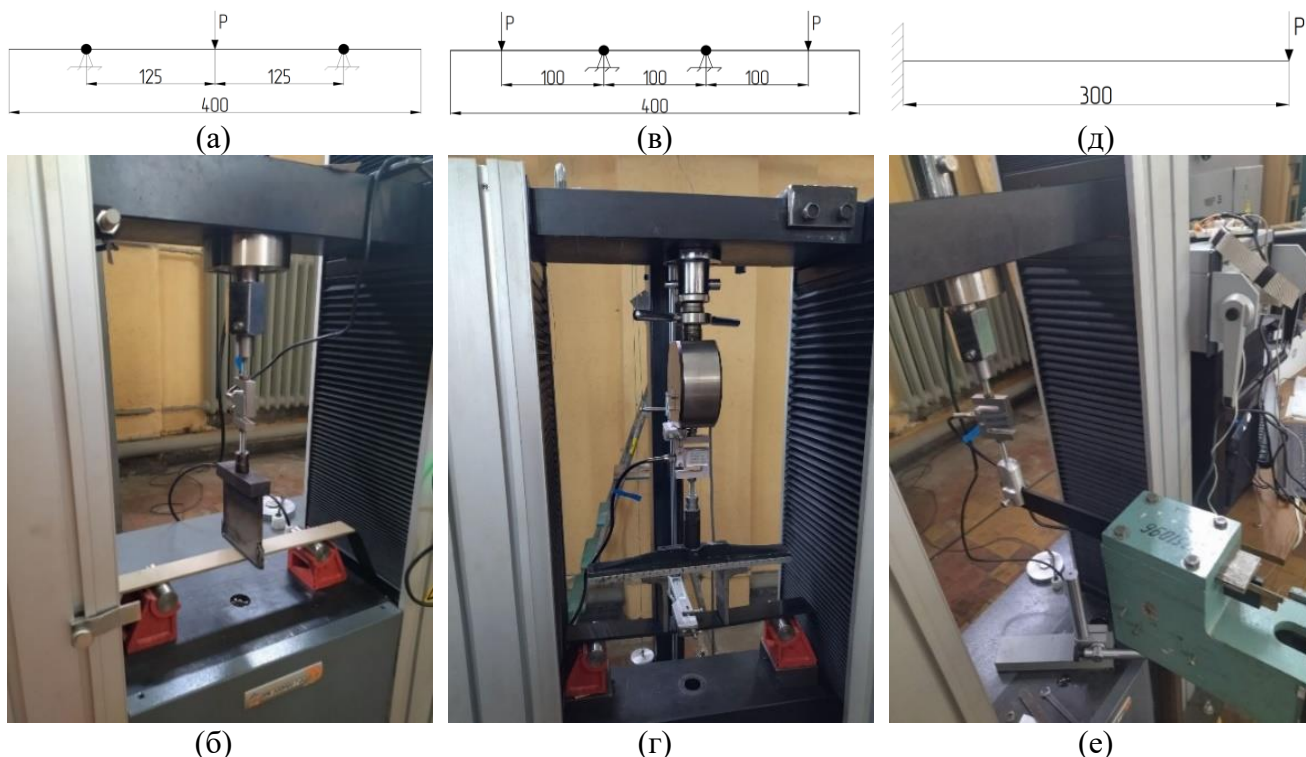


Рисунок 1.1 – Расчетные случаи для балок: (а), (б) – трехточечный изгиб; (в), (г) – четырехточечный, (д), (е) – изгиб консольной балки с жесткой заделкой

Профиль всех рассматриваемых балок – полоса, установленная горизонтально при трех- и четырехточечном изгибе, и вертикально, в случае расчета консоли с заделкой. Размеры поперечного сечения полос: 37,9x5,7 мм.

Теоретический расчет изгиба балок выполнен согласно [47].

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов выполнено по прогибу выбранного сечения балки. При трехточечном изгибе и изгибе консоли с жесткой заделкой прогиб балки измерялся в точке приложения нагрузки, при четырехточечном изгибе – посередине балки (между ножами). Испытания выполнены на базе лабораторного комплекса научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники «Калининградского государственного технического университета» (НОЦ СМИТ КГТУ).

Нагружение балки выполнено непрерывно, с помощью электромеханической универсальной испытательной машины РЭМ-10-А-1-2. Скорость нагружения – 1 мм/мин. Испытания проведены при температуре 23,6°C и влажности 52%. Свидетельство о поверке испытательного оборудования представлено в приложении А. Значение перемещений фиксировалось с помощью датчика перемещения траверсы испытательной машины, усилия – с помощью откалиброванного тензодатчика, установленного между нагружающей траверсой и испытываемым образцом. Результаты исследования изгиба балок на отдельных ступенях нагружения представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнение результатов изгиба балок из ПНД

Показатель	Значение					
Трехточечный изгиб						
Нагрузка, кг	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
Макс. норм. напряж., МПа	1,49	2,99	4,48	5,97	7,47	8,96
Прогиб экспер., мм	1,68	3,52	5,63	7,98	10,6	13,5
Прогиб расчет., мм	2,82	5,65	8,47	11,3	14,1	16,9
Разница между расчетными и экспериментальными прогибами, %	42,3	37,6	33,6	29,3	25,0	20,4
Четырехточечный изгиб						
Нагрузка, кг	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
Макс. норм. напряж., МПа	1,19	2,39	3,58	4,78	5,97	7,17
Прогиб экспер., мм	2,43	5,38	8,46	12,2	16,3	20,9
Прогиб расчет., мм	4,15	8,31	12,5	16,6	20,8	24,9
Разница между расчетными и экспериментальными прогибами, %	41,6	35,2	32,1	26,7	21,6	16,0
Изгиб консоли с жесткой заделкой						
Нагрузка, кг	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00
Макс. норм. напряж., МПа	1,44	2,88	4,31	5,75	7,19	8,63
Прогиб экспер., мм	0,69	1,51	2,38	3,52	5,22	6,89
Прогиб расчет., мм	1,05	2,09	3,14	4,18	5,23	6,28
Разница между расчетными и экспериментальными прогибами, %	34,4	27,8	24,1	15,9	0,25	9,77

По результатам испытаний можно заметить, что расчет конструкций из ПНД как из изотропного и линейно-упругого материала дает достаточно большую погрешность по критерию прогиба балок на изгиб – до 43%.

Исследование изгиба пластины выполнено на одном расчетном случае – пластина с жестко зашпеленными кромками по всему периметру и сосредоточенной силой в центре. Размеры пластины: 150x150x6,0 мм. Материал пластины – ПНД, как при испытаниях балок. Теоретический расчет данного случая выполнен в соответствии с [48]. Процедура проведения испытаний по данному расчетному случаю представлена на рисунке 1.2.

Измерение прогиба пластины выполнялось под точкой приложения нагрузки.

Нагружение балки выполнено непрерывно, с помощью электромеханической универсальной испытательной машины РЭМ-10-А-1-2.



Рисунок 1.2 – Проведение испытаний пластины на изгиб

Скорость нагружения – 1 мм/мин. Испытания проведены при температуре 23,5°С и влажности 56%.

Значение перемещений и нагрузки фиксировались с помощью встроенных датчиков испытательной машины. Результаты исследования изгиба пластины на отдельных ступенях нагружения представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнение результатов изгиба пластины из ПНД

Показатель	Значение					
Нагрузка, кг	3,00	6,00	9,00	12,0	15,0	18,0
Макс. норм. напряж., МПа	2,18	4,36	6,54	8,72	10,9	13,1
Прогиб экспер., мм	0,10	0,23	0,36	0,52	0,67	0,84
Прогиб расчет., мм	0,19	0,39	0,58	0,77	0,97	1,16
Разница между расчетными и экспериментальными прогибами, %	46,6	41,3	37,5	32,8	30,2	27,2

По результатам испытаний пластины также наблюдается существенная разница между теоретическими и экспериментальными значениями прогиба пластины – до 47%.

При этом, предлагаемый КО Франции и Италии подход не позволяет учесть вязкоупругие свойства ПНД (ползучесть и релаксацию), играющие большую роль в оценке длительной прочности проектируемых конструкций.

С учетом вышеизложенного, формирование новой методики проектирования СКК из термопластов, учитывающей реальные ФМХ материала, является актуальной задачей.

1.3 Выбор объекта проектирования

Демонстрация использования методики определения размеров ККС из термопластов выполнена на примере типовой конструкции плавучего причала. Чертеж общего расположения выбранного объекта проектирования представлен в приложении Б.

Формула класса рассматриваемого плавучего причала – К^Ф Р 1,2 I – плавучий причал, предназначенный для эксплуатации в бассейнах разряда не выше разряда «Р» с допускаемой при эксплуатации высотой волны не более 1,2 м. Плавучий причал относится к объектам группы I – однокорпусные и многокорпусные объекты, предназначенные для нахождения на них временно или постоянно пассажиров (посетителей). Класс судна принят согласно Правилам [49].

Тип плавучего объекта: грузопассажирский плавучий причал из термопласта.

Назначение плавучего объекта: швартовка судов длиной до 15 метров для снятия грузов и обеспечения посадки/высадки пассажиров.

Главные размерения плавучего причала представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Главные размерения плавучего причала

Наименование	Значение
Длина габаритная, м	16,04
Длина наибольшая, м	16,00
Ширина габаритная, м	4,04
Ширина наибольшая, м	4,00
Высота борта, м	1,10
Высота габаритная, м	2,35
Осадка по КВЛ, м	0,50

Причаливание судов к плавучему объекту предполагается вдоль любой из длинных сторон причала. Швартовка судов выполняется за двухтумбовые кнехты, установленные в носовой, средней и кормовой части причала с каждого борта. За счет цепных лееров, установленных вдоль диаметральной плоскости (ДП) у бортов, обеспечивается возможность погрузки/разгрузки в любой точке у борта.

Эксплуатация плавучего объекта предполагается в акваториях, с высотой волны не более 1,2 м и в диапазоне температур от – 20 до +50 °С в период навигации (безледовый период).

Корпус причала разделен одной продольной (по ДП) и тремя поперечными (на 8, 16 и 24 шп.) водонепроницаемыми переборками на 8 отсеков. Каждый отсек вентилируется естественным путем за счет вентиляционных гуськов, выведенных на палубу. Палуба причала покрыта деревянным настилом.

Доступ в отсеки причала осуществляется за счет горловин, размещенных на палубе.

В приложении В представлен эскиз конструкции корпуса плавучего причала. В приложении представлены эскизы каждого отдельного перекрытия и трехмерная модель конструкции причала. Корпус причала имеет поперечную монотонную систему набора из полосового профиля. На расстоянии 1000 мм от ДП с каждого борта предусмотрена установка продольных днищевых и палубных балок.

Материал корпуса: рассматривается два разных корпуса из различных термопластов – один из полиэтилена низкого давления, второй – из непластифицированного поливинилхлорида.

1.4 Вывод по главе 1

В отечественной практике судостроения отсутствует методология проектирования СКК из термопластов. В то же время, в зарубежных КО подобные требования и рекомендации имеются. Некоторые из них носят ограниченный и эмпирический характер (КО Хорватии, Индии, Турции и Норвегии/Германии). Некоторые – достаточно структурные и полноценные (КО Италии и Франции), но предлагаемый ими подход, на практике, может дать существенную погрешность между расчетными и реальными величинами (до 47%). Данная погрешность обусловлена тем,

что применение классических схем (как для стали – изотропного и линейно-упругого материала) для расчета прочности, жесткости и устойчивости конструкций из термопластов не может быть исполнено в должной мере, в связи с особенностями ФМХ термопластов. В связи с этим, **требуется доработка имеющихся или разработка новой прикладной методики, позволяющей учитывать реальные ФМХ термопластов.**

Разработка и реализация нового подхода к определению размеров связей СКК из термопластов, будет выполнена на типовой конструкции плавучего причала с размерами корпуса 16,0х4,0х1,0 м, из ПНД и НПВХ

2 ФОРМИРОВАНИЕ НОВОЙ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТОВ

2.1 Алгоритм проектирования

Предлагаемый алгоритм проектирования ККС из термопластов представлен в виде схемы, на рисунке 2.1.

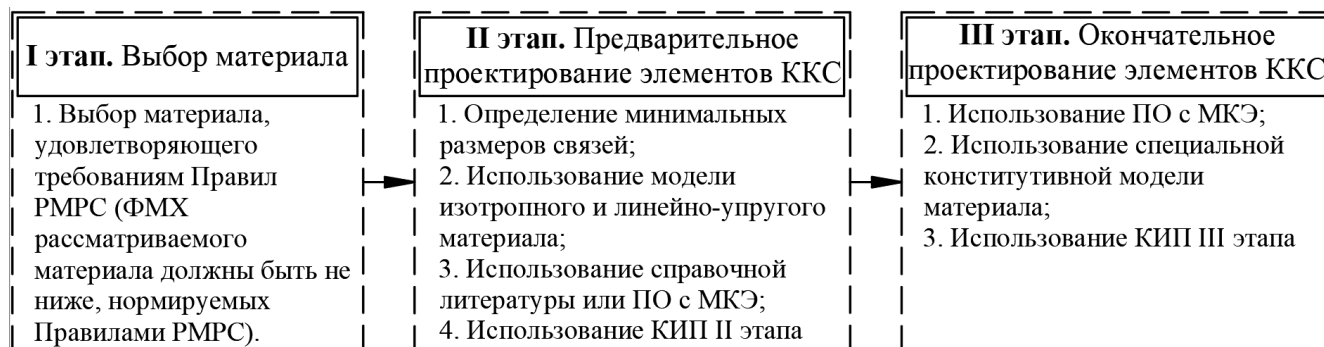


Рисунок 2.1 – Предлагаемый алгоритм проектирования корпусных конструкций из термопластов

Данный алгоритм можно разделить на 3 ключевых этапа.

Этап І. Выбор материала. Необходимость данного этапа обусловлена исключением из рассмотрения некачественного материала, ФМХ которого могут оказаться недостаточными, для работы в качестве ОКМ СКК. Данный этап присутствует во всех рассмотренных ранее ИКО, и подразумевает проверку свойств термопласта минимальным критериям, изложенным в Правилах. Ввиду того, что в настоящий момент в Правилах отечественных КО подобных требований к материалу нет, они должны быть разработаны в обязательном порядке.

Этап ІІ. Предварительное проектирование элементов ККС. На данном этапе выполняется определение минимальных и расчетных размеров связей из условия применения к термопласту модели изотропного и линейно-упругого материала.

Определение минимальных размеров связей необходимо по различным причинам:

1. для исключения возможных ошибок в результате расчетного определения размеров связей;
2. для обеспечения минимально достаточной жесткости элементов ККС и пр.

Среди рассмотренных Правил ИКО (п. 1.1), подобные рекомендации присутствуют только в Правилах КО Италии и Франции:

- минимальный момент сопротивления балок набора – 15 см³ (Италия и Франция);
- минимальная толщина пластин корпуса – 10 мм (Франция).

Однако, данные рекомендации требуют пересмотра, поскольку не обеспечиваются в реальной практике судостроения (см. п. 2.4).

Определение размеров связей ККС расчетным путем, согласно зарубежному опыту (п. 1.1), условно, можно разделить на две основные группы:

1. путем использования эмпирической формулы, позволяющей определить рекомендуемую толщину бортовой и днищевой обшивки (Хорватия, Норвегия/Германия, Турция и Индия);

2. расчетным путем, из условия рассмотрения материала как изотропного и линейно-упругого (Франция и Италия).

Требования BV и RINA являются более гибкими и универсальными – они позволяют выполнять расчеты любых размеров связей ККС с помощью стандартных формул и инженерных подходов, как аналитически (с помощью базовых справочников и учебников [47, 48, 50, 51 и др.]), так и с помощью различного программного обеспечения (ПО), в том числе, ПО, выполняющего расчеты прочности методом конечных элементов (например, «Ansys», «Fidesys», «Abaqus» и пр.).

Однако, данный подход, как было показано ранее, может привести к значительной разнице между расчетными и фактическими характеристиками НДС конструкций.

Предлагается, на этапе предварительного проектирования размеров связей, сохранить данный подход при условии занижения коэффициентов использования прочности (величина, обратная коэффициенту запаса прочности), в том числе, на учет реальных ФМХ материала. Данная группа КИП в дальнейшем будет называться «КИП II этапа»

Этап III. Окончательное проектирование элементов ККС (выполнение проверочных расчетов). Выполнение данного этапа необходимо для понимания работы проектируемых конструкций с учетом реальных ФМХ материала в различных условиях нагружения в интересующий период (или интервал) времени. В настоящий момент, данный этап отсутствует во всех Правилах ИКО.

Ввиду того, что выполнение подобных расчетов аналитически достаточно трудоемко, реализация данного этапа проектирования предполагается с помощью МКЭ.

Для того, чтобы учесть реальные ФМХ термопласта, необходимо подобрать и определить коэффициенты специальной конститутивной модели материала (СКММ). Предполагается, что данная модель материала сможет учитывать скорости нагружения, температуры работы конструкции, а также вязкоупругие свойства материала. Учет данных факторов непосредственно в расчете, позволит точнее и детальнее изучать работу конструкций в реальных эксплуатационных условиях, а также прогнозировать поведение конструкции со временем.

В таком случае, СКММ будет учитывать ряд факторов, которые на II этапе проектирования фигурировали в КИП, и не учитывались непосредственно в выполнении

расчетов. Как следствие, коэффициенты использования прочности на III этапе должны быть переработаны. Данная группа КИП в дальнейшем будет называться «КИП III этапа»

Таким образом, для реализации предлагаемого алгоритма проектирования СКК из термопластов необходимо:

1. сформировать перечень требований к ФМХ термопластов;
2. разработать требования к назначению минимальных размеров связей;
3. определить значения КИП II и III этапов;
4. подобрать и определить коэффициенты СКММ термопластов для выполнения проверочных расчетов прочности.

2.2 Определение перечня минимальных требований к физико-механическим характеристикам термопластов для отечественных классификационных обществ.

В настоящий момент, в требованиях Правил РМРС или РКО отсутствует информация в отношении минимальных ФМХ термопластов, используемых в качестве ОКМ для судов.

Следует отметить, что термопластичные материалы относятся к категории «пластмасс», в результате чего, к ним можно применить требования разделов 6 [52, 53] и раздела 6 части X [54]. Рассматривая пластмассы как ОКМ, отечественные КО предъявляют требования только к полимерным композиционным материалам (ПКМ). В Правилах РМРС, вопросу прочности и конструкции судов из ПКМ разделе 6 посвящена отдельная часть Правил [55].

Общие требования, предъявляемые к пластмассам в целом, сводятся к тому, что материалы должны:

1. оцениваться по горючести, распространению пламени, воспламеняемости, а также по количеству дыма и токсичных веществ;
2. обеспечивать надежную работу конструкций и изделий на открытой палубе при температуре от -40 до $+70$ °С, во внутренних помещениях судна при температуре от -10 до $+70$ °С, если условия эксплуатации не предусматривают более низких или более высоких рабочих температур;
3. не становиться хрупкими в процессе эксплуатации и не снижать механических характеристик более чем на 30 % первоначальных значений;
4. быть стойкими против гниения и поражения грибами, а также не оказывать отрицательного влияния на материалы, с которыми они соприкасаются.

Данные требования оценивают пластмассы по их пожарной безопасности, долговечности и надежности, но не нормируют их базовые ФМХ.

В то же время, в Правилах РМРС [52], с 2026 года появился новый раздел (п. 6.15), посвященный требованиям к термопластам, применяемым для изготовления полимерных модулей плавучести. Предъявляемые требования к ФМХ материала представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Требования к термопластам, используемым для изготовления полимерных модулей плавучести

Свойство	Норматив
Предел текучести	Определяется изготовителем
Предел прочности	Определяется изготовителем
Относительное удлинение	Определяется изготовителем
Температура хрупкости при ударе ИЛИ минимальная температура при испытаниях на растяжение	Устанавливается в зависимости от условий эксплуатации.
Температура тепловой деформации	Не ниже плюс 70 °С при эксплуатации без защиты от нагрева солнцем; или не ниже температуры, установленной изготовителем при эксплуатации с защитой от нагрева солнцем
Стойкость к старению после воздействия морской воды	Падение характеристик не более чем на 30 % при испытаниях на растяжение
Стойкость к старению после ультрафиолетового излучения	Падение характеристик не более чем на 30 % при испытаниях на растяжение

Представленный перечень требований применим только к материалам модулей плавучести, но не применим к ОКМ для изготовления СКК.

Для разработки требований к ФМХ термопластов, выполнен анализ Правил ИКО. Были рассмотрены требования тех же КО, что и в п. 1.1, за исключением Хорватии, поскольку в Правилах CRS отсутствуют требования к минимальным ФМХ термопластов. Однако, подобные требования есть в Правилах КО Кореи [56]. Краткий обзор требований представлен в приложении Г.

Зарубежные КО имеют требования к таким термопластам, как АБС-пластик, ПНД, ПСД и ПВД, в то время как на практике, большая часть судов изготавливается из ПНД. В связи с этим, в последующем анализе рассмотрены требования только к ПНД. Требования КО к ФМХ ПНД представлены в таблице 2.2.

Из таблицы 2.2 виден разный подход к нормированию минимальных ФМХ разных КО – требования IRS, TL и KR затрагивают гораздо более обширный перечень особенностей материала, чем требования BV и RINA.

В качестве основы для формирования отечественных требований к ФМХ термопластов, использованы критерии итальянского КО, представленные в таблице 2.3.

Таблица 2.2 – Результаты сравнительного анализа минимальных ФМХ для ПНД

Свойство	IRS (Индия)		TL (Турция)		KR (Корея)		RINA (Италия)		BV (Франция)	
	Значение	Примеч.	Значение	Прим.	Значение	Прим.	Значение	Прим.	Значение	Прим.
Плотность	0,946-0,972 г/см ³	-	0,946-0,972 г/см ³	-	0,946-0,972 г/см ³	-	0,946 г/см ³	-	0,950 г/см ³	-
Индекс текучести расплава	0,030 – 10 г/10 мин	190 °C / 2,16 кг	0,030 – 10 г/10 мин	190 °C / 2,16 кг	0,030 – 10 г/10 мин	190 °C / 2,16 кг	-	-	-	-
Предел текучести при растяжении	17 МПа	-	17 МПа	-	17 МПа	-	22 МПа	-	24 МПа	-
Предел прочности при растяжении	24 МПа	-	24 МПа	-	24 МПа	-	-	-	-	-
Удлинение при пределе текучести при растяжении	1,0 – 27 %	-	1,0 – 27 %	-	1,0 – 27 %	-	13 %	-	13 %	-
Удлинение при разрыве при растяжении	10 – 1500 %	-	10 – 1500 %	-	10 – 1500 %	-	-	-	-	-
Модуль ползучести при растяжении	292 МПа	после 1000 часов	292 МПа	после 1000 часов	292 МПа	после 1000 часов	-	-	-	-
Напряжение при сжатии	20 МПа	-	20 МПа	-	20 МПа	-	-	-	-	-
Модуль сдвига	18 МПа	-	18 МПа	-	18 МПа	-	300 МПа	-	300 МПа	-
Предел прочности при изгибе	40 МПа	-	40 МПа	-	24 МПа	-	-	-	-	-
Модуль упругости при изгибе	750 МПа	-	750 МПа	-	750 МПа	-	-	-	-	-
Твердость	± 3 от паспортного значения	по шору D	± 3 от паспортного значения	по шору D	± 3 от паспортного значения	по шору D	-	-	-	-
Ударная вязкость (испытание на падение без надреза)	15 Дж/мм толщины	-	15 Дж/мм толщины	-	15 Дж/мм толщины	при температуре 0 °C	-	-	-	-
Ударная вязкость с надрезом (маятниковый тест с надрезом)	не хрупкое разрушение	визуально	не хрупкое разрушение	визуально	не хрупкое разрушение не менее 196 Дж/м	визуально (при температуре 0 °C)	-	-	-	-
Содержание пор	не более 15 % от толщины	в конструктивных элементах	не более 15 % от толщины	в конструктивных элементах	не более 15 % от толщины	-	-	-	-	-
	не более 20 % от толщины	в других местах	не более 20 % от толщины	в других местах						
Ударная прочность состаренного материала	не хрупкое разрушение 1,0 Дж/см ³	визуально	не хрупкое разрушение 1,0 Дж/см ³	визуально	не хрупкое разрушение	визуально (при температуре 0 °C)	-	-	-	-
Водопоглощение	0,010 – 0,017 %	24 часа	0,010 – 0,017 %	24 часа	не более 0,017 %	-	0,010 – 0,017 %	24 часа	-	-
Число вязкости (пониженная вязкость)	157,8 – 398,3 мл/г	-	157,8 – 398,3 мл/г	-	-	-	-	-	-	-
Напряжение на разрушении при растяжении	-	-	14 МПа	-	-	-	30 МПа	-	-	-
Температура тепловой деформации под нагрузкой	-	-	-	-	69 °C	-	-	-	-	-
Температура размягчения по Вика	-	-	-	-	120°C	-	-	-	-	-
Предел прочности при растяжении (материал в районе зоны сварного шва)	-	-	-	-	прочность основного материала на растяжение	испытание на растяжение основного материала при температуре 20°C	-	-	-	-
Модуль упругости при пределе текучести при растяжении	-	-	-	-	-	-	950 МПа	-	950 МПа	-
Предел текучести при сдвиге	-	-	-	-	-	-	14 МПа	-	14 МПа	-
Коэффициент Пуассона	-	-	-	-	-	-	0,45	-	0,45	-
Температура длительной эксплуатации	-	-	-	-	-	-	80 °C	-	80 °C	-

Таблица 2.3 – Требования RINA к минимальным характеристикам ПНД

Свойство	Ед. изм.	ПНД	Примечание
Плотность	г/см ³	0,946	-
Предел текучести при растяжении	МПа	22	-
Напряжение при разрушении при растяжении	МПа	30	-
Удлинение при пределе текучести при растяжении	%	13	-
Модуль упругости при пределе текучести	МПа	950	-
Модуль сдвига при текучести	МПа	300	-
Предел текучести при сдвиге	МПа	14	-
Коэффициент Пуассона	-	0,45	-
Температура длительной эксплуатации	°C	80	-
Водопоглощение	%	0,010 – 0,017	24 часа

Некоторые ФМХ, представленные в данной таблице, требуют определенных пояснений:

1. «модуль упругости (модуль Юнга) при пределе текучести». Указаний для определения данной величины в Правилах КО Италии не представлено, однако, вероятно, имеется ввиду определение модуля упругости (модуля Юнга) на начальном участке диаграммы до достижения предела текучести материала при растяжении;

2. «модуль сдвига при текучести». Пояснения для определения данного параметра также отсутствуют. По аналогии с п. 1, допускается, что имеется ввиду определение модуля сдвига на начальном участке диаграммы при проведении испытания на сдвиг;

3. «предел текучести при растяжении». Для определения данной величины в Правилах RINA и BV представлено графическое пояснение, приведенное на рисунке 2.2. Следует отметить, что, если обратиться к типовым диаграммам растяжения термопластов (см. рисунок 2.3), то с достижением «предела текучести при растяжении» диаграмма имеет выраженный нисходящий характер. В связи с этим «предел текучести при растяжении», по существу, может рассматриваться как «предел прочности», поскольку характеризуется максимальной нагрузкой, воспринимаемой образцом. По опыту зарубежного КО, данная характеристика, далее по тексту, будет рассматриваться как «предел текучести при растяжении».

4. «напряжение при разрушении при растяжении». Пояснений для определения данной величины в Правилах КО не представлено. Однако, можно обратить внимание, что минимальное значение данного параметра (30 МПа) больше, чем предел текучести на растяжение (22 МПа).

В то же время, если посмотреть на типовую кривую «нагрузка/удлинение», формируемую на испытательном оборудовании в процессе проведения испытания на растяжение (рисунок 2.3), можно увидеть, что при достижении определенного усилия, кривая имеет исключительно нисходящий характер [57, 58].

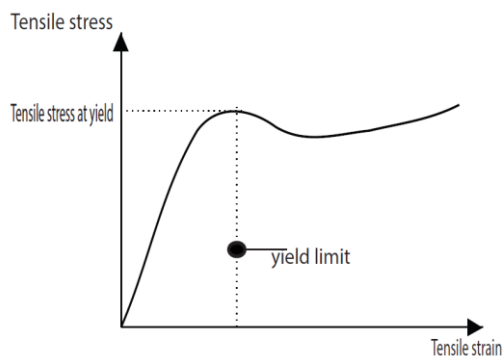


Рисунок 2.2 – Пояснение для определения предела текучести при растяжении [33]

(«Tensile stress» – растягивающее напряжение;
 «Tensile strain» – деформация при растяжении;
 «Tensile stress at yield» – предел текучести;
 «yield limit» – деформация при текучести)

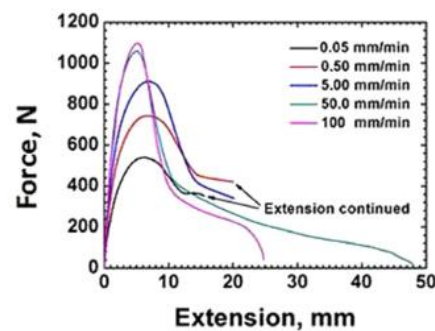


Рисунок 2.3 – Кривые «нагрузка/удлинение» при испытании образцов из ПНД на различной скорости [57]

(«Force, N» – сила, Н; «mm/min» – мм/мин
 «Extension, mm» – удлинение, мм;
 «Extension continued» – продолжающееся удлинение)

Это, вероятно, означает, что в требованиях Правил [33], под «напряжением при разрушении при растяжении» имеется ввиду напряжение, получаемое расчетом с учетом реального изменения площади поперечного сечения образца в процессе испытания – «истинное напряжение».

В случае, если определяются «условные напряжения», то нагрузка, определяемая в процессе испытания, делится на начальную площадь поперечного сечения образца, а если определяются «истинные напряжения», то на реальную площадь поперечного сечения образца, уменьшаемую в процессе испытания. Таким образом, формируется «условная диаграмма растяжения» (engineering stress strain curve) и «истинная диаграмма растяжения» (true stress strain curve). Наглядная разница между двумя диаграммами показана на рисунке 2.4. [58]

В обоих случаях, характеристика «напряжение при разрушении при растяжении» отражает свойство материала после достижения предела текучести, т.е. при наличии существенных пластических деформаций.

Так как достижение передела текучести при проектировании судовых конструкций не допускается, то характеристика «напряжение при разрушении» не будет фигурировать в требованиях к ФМХ термопластов впоследствии.

5. «температура длительной эксплуатации». Пояснений для определения данной величины в Правилах КО не представлено. Проведение испытаний для получения данной характеристики является затруднительным, ввиду отсутствия соответствующей регламентирующей нормативной документации.

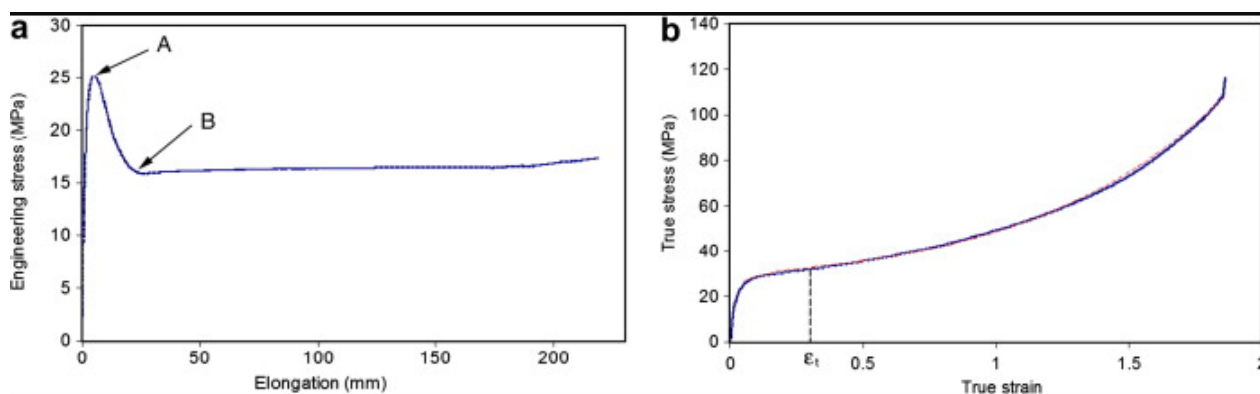


Рисунок 2.4 – (а) Условная диаграмма растяжения ПНД; (б) истинная диаграмма растяжения ПНД [58]

(«Engineering stress (MPa)» – инженерное напряжение (МПа); «Elongation (mm)» – удлинение, мм;

«True stress (MPa)» – реальное напряжение (МПа); «True strain» – реальная деформация)

Данная характеристика упоминается Правилами RINA и BV, но ни одно из данных классификационных обществ не предоставляет никаких пояснений в части ее экспериментального исследования. В иных нормативных документах, размещенных в открытом доступе, методика определения «температуры длительной эксплуатации» также отсутствует. Кроме того, требования к определению данной характеристики не указываются даже в технической документации крупнейших мировых производителей листового ПНД [59-61]. В связи с этим, данная величина не будет фигурировать в последующих требованиях к ФМХ материала.

6. «коэффициент Пуассона». Данная величина характеризует упругие свойства материала – чем больше данное значение, тем больше материал проявляет упругие свойства (средний коэффициент Пуассона бетона – 0,2, резины – 0,48). В связи с этим, определяя пороговое значение коэффициента Пуассона, равное 0,45, имеется ввиду, согласно комментариям эксперта RINA, его максимальная граница, а не минимальная.

7. «удлинение при пределе текучести при растяжении». Согласно комментариям эксперта RINA, пороговое значение данной величины также относится к критерию максимального значения.

В то же время, применение термопластов при повышенных температурах должно быть ограничено – при повышении температуры он размягчается, теряет свою несущую способность и может перейти в фазу вязко-текучего состояния. По этой причине, в качестве одной из необходимых нормируемых характеристик материала предлагается рассмотреть температуру тепловой деформации. Данная характеристика фигурирует как в отечественных Правилах (см. таблицу 2.1), так и в Правилах KR (см. таблицу 2.2.). В качестве порогового значения, предлагается назначить температуру 70°C.

С учетом того, что СКК подвержены изгибающим нагрузкам, учет физико-механических свойств материала при изгибе также является важным параметром для ОКМ. Поэтому, в перечень нормируемых ФМХ целесообразно включить модуль упругости при изгибе и предел прочности при изгибе. Данные характеристики также отдельно нормируются КО Индии, Кореи и Турции. В качестве пороговых значений предлагается использовать опыт турецкого и индийского КО – 40 МПа для предела прочности на изгиб и 750 МПа для модуля упругости при изгибе.

На основе вышеизложенного, сформирован перечень необходимых испытаний термопластов с указанием нормативных документов для их определения (см. таблицу 2.4), а также требования к пороговым ФМХ ПНД (см. таблицу 2.5).

Таблица 2.4 – Перечень необходимых испытаний для термопластов

Характеристика	Ед. изм.	Нормативные документы	
		Отечественные	Зарубежные
Плотность	г/см ³	ГОСТ 15139-69	ISO 1183-1
Предел текучести при растяжении	МПа	ГОСТ 34370-2017 ГОСТ 11262-2017	ISO 527-1:2012
Удлинение при пределе текучести при растяжении	%		
Модуль упругости (модуль Юнга) при растяжении	МПа		
Коэффициент Пуассона	-		
Модуль сдвига	МПа	ГОСТ Р 57207-2016	ASTM D732-2010
Предел текучести при сдвиге	МПа		
Водопоглощение	%	ГОСТ 4650-80	ISO 62:2008
Предел прочности при изгибе	МПа	ГОСТ 4648-2014	ISO 178:2010
Модуль упругости при изгибе	МПа		
Температура тепловой деформации	°С	ГОСТ 34371-2017	ISO 75-1:2020 ASTM D648-2007

Таблица 2.5 – Требования к пороговым характеристикам ПНД

Свойство	Ед. изм.	Значение	Примечание
Плотность	г/см ³	0,946	-
Предел текучести при растяжении	МПа	22	-
Удлинение при пределе текучести при растяжении	%	13	-
Модуль упругости при растяжении	МПа	950	-
Модуль сдвига	МПа	300	-
Предел текучести при сдвиге	МПа	14	-
Коэффициент Пуассона	-	0,45	-
Водопоглощение	%	0,010 – 0,017	24 часа
Предел прочности при изгибе	МПа	40	-
Модуль упругости при изгибе	МПа	750	-
Температура тепловой деформации	°С	70	метод В

Данный перечень испытаний с указанием пороговых значений для ПНД был направлен на рассмотрение в РМРС и получил одобрение для внедрения в Правила, о чем свидетельствует акт внедрения, представленный в приложении Д.

Полученные результаты обеспечивают выполнение I этапа проектирования, согласно предлагаемой методике.

2.3 Обоснование и выбор рассматриваемых материалов

Как было отмечено ранее, из термопластов, в качестве ОКМ, чаще всего используется ПНД. В то же время, промышленности известен такой термопласт, как НПВХ – твердый, жесткий полимерный материал, получаемый в результате полимеризации мономера винилхлорида без добавления пластификаторов.

В настоящий момент, НПВХ не применяется в судостроении в качестве ОКМ, за исключением небольших плотов, сделанных из НПВХ труб [6-9]. В судостроении НПВХ применяется для изготовления отдельных систем трубопроводов на судах [62].

Согласно информации зарубежных производителей [63], большинство усредненных ФМХ НПВХ лучше, чем у ПНД, за исключением ударной вязкости – показатель ударной вязкости у НПВХ в 4-5 раз меньше, чем у ПНД, что может ограничивать возможность его применения в качестве ОКМ в малотоннажном судостроении. Однако, если эксплуатационные условия судна или плавучего объекта не подразумевают существенных динамических нагрузок, то применение НПВХ в качестве ОКМ может оказаться целесообразным.

Для оценки целесообразности использования НПВХ в качестве ОКМ, был выполнен комплекс испытаний, согласно разработанному перечню, представленному в таблице 2.4, за исключением определения температуры тепловой деформации, ввиду отсутствия в испытательном лабораторном комплексе НОЦ СМИТ КГТУ необходимого оборудования. Дополнительно, были проведены испытания на сжатие отдельных материалов.

В испытаниях рассматривались все виды НПВХ отечественного производства:

1. НПВХ типа «RS-Rigid» от отечественного производителя ООО «Ялукс-Групп» (НПВХ RR);
2. НПВХ от отечественной компании ПАО «Владимирский химический завод» (НПВХ ВХЗ);
3. НПВХ, изготовленный из вторичного сырья (ВПВХ) от компании ООО «Калининградский Композитный Завод».

Помимо отечественного материала, в испытаниях также рассматривался НПВХ зарубежных производителей. НПВХ крупных европейских компаний «Simona», «Agru»,

«Epsotech» в настоящий момент в Россию практически не поставляется. Большинство импортируемого НПВХ поставляется с Китая, поэтому этот материал также был испытан (НПВХ Китай).

Полученные значения ФМХ НПВХ сравнивались с ФМХ ПНД, производства компании ООО «Техноком» (ПНД ТК). Листовой ПНД изготовлен из полиэтилена марки HD 03594 PE компании ПАО «Сибур Холдинг».

Испытания на растяжение, сжатие изгиб и сдвиг выполнялись с помощью поверенной испытательной машины РЭМ-10-А-1-2. Скорость нагружения – 5 мм/мин. Испытания проведены при температуре 24,8°C и влажности 25%.

Определение коэффициента Пуассона и модуля сдвига выполнено с помощью тензорезисторов, регистрация показаний которых выполнялась с помощью прибора ИДЦ-1. Нагружение образцов выполнялись на испытательной машине РЭМ-10-А-1-2. Образец для определения коэффициента Пуассона представлен на рисунке 2,5, для определения модуля сдвига – на рисунке 2.6.



Рисунок 2.5 – Образец из НПВХ ВХЗ с наклеенными тензорезисторами для определения коэффициента Пуассона

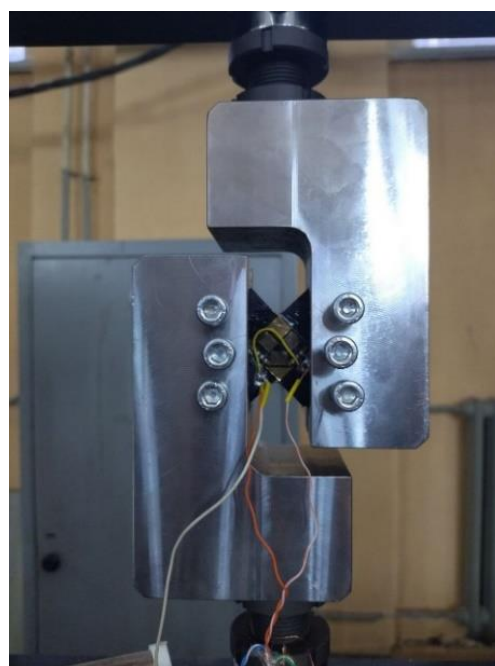


Рисунок 2.6 – Образец из ПНД с наклеенными тензорезисторами для определения модуля сдвига

Значение водопоглощения определялось после выдержки в течении 24 часов в дистиллированной воде. Массы образцов до и после испытаний фиксировались с помощью аналитических весов OHAUS Pioneer PA214.

Каждая характеристика определена по результатам испытаний 5 образцов. Результаты испытаний представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты сравнительных испытаний термопластов

Физико-механические характеристики	ПНД ТК	НПВХ ВХЗ	НПВХ RR	НПВХ Китай	ВПВХ
Плотность, г/см ³	0,967	1,447	1,578	1,768	1,510
Предел текучести при растяжении, МПа	23,7	51,0	38,3	27,6	37,3
Относительное удлинение при пределе текучести, %	17,80	6,68	6,77	5,03	6,13
Модуль упругости при растяжении, МПа	967	3204	3211	3459	2680
Предел прочности при сдвиге, МПа	14,7	35,3	29,8	23,7	28,3
Модуль сдвига, МПа	730	2574	3093	4071	2777
Коэффициент Пуассона	0,446	0,337	0,348	0,333	0,372
Водопоглощение (за 24 часа), %	0	0,0170	0,0082	0,0020	0,0234
Предел прочности при изгибе, МПа	30,4	84,1	72,9	60,4	69,6
Модуль упругости при изгибе, МПа	864	3208	3331	3894	2930
Предел текучести при сжатии ¹ , МПа	15,1	64,7	60	- ²	- ²
Модуль упругости при сжатии, МПа	306	1162	796	- ²	- ²

Примечание:

1 – для ПНД в качестве предела текучести при сжатии принимается напряжение, соответствующее относительной деформации 0,05

2 – испытания ВПВХ и НПВХ Китай на сжатие не проводились по техническим причинам.

На рисунках 2.7-2.9 представлены диаграммы для различных материалов при различных видах нагружения: на рисунке 2.7. представлены участки типовых диаграмм растяжения до относительной деформации, соответствующей 5%, на рисунке 2.8. – участки кривых зависимостей «изгибающий момент / относительная деформация» до относительной деформации, соответствующей 15%, на рисунке 2.9 – диаграммы сжатия до относительной деформации, соответствующей 30%. Полные диаграммы, до момента окончания испытания или разрушения образца, не представлены.

Сравнивая характеристики ПНД и НПВХ, можно отметить, что прочностные и жесткостные параметры последних при испытаниях на растяжение, изгиб и сдвиг заметно выше, чем у ПНД.

Сравнивая между собой первичный и вторичный жесткий ПВХ, существенных недостатков последнего практически не наблюдается, за исключением повышенной склонности к абсорбции воды, и несколько заниженных жесткостных параметров (модуль упругости при растяжении и изгибе, модуль сдвига). Однако, в настоящий момент из вторичного ПВХ листовые элементы, пригодные для изготовления судовых корпусных конструкций, в РФ не производятся, вследствие чего, данный материал в дальнейшей работе не рассматривается.

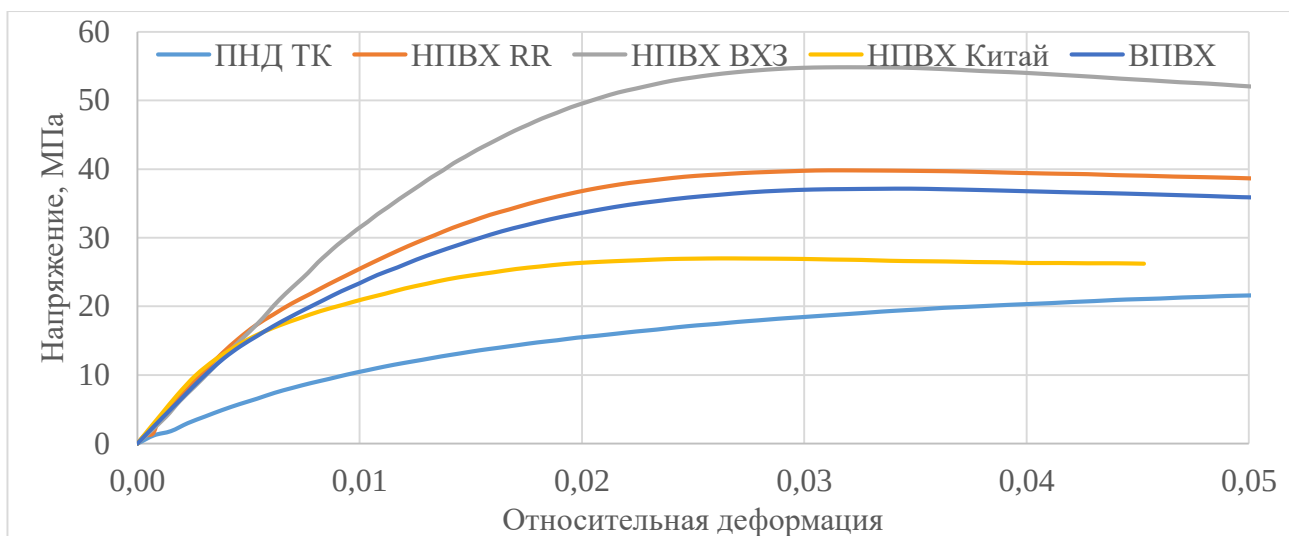


Рисунок 2.7 – Участки типовых диаграмм растяжения образцов из различных материалов

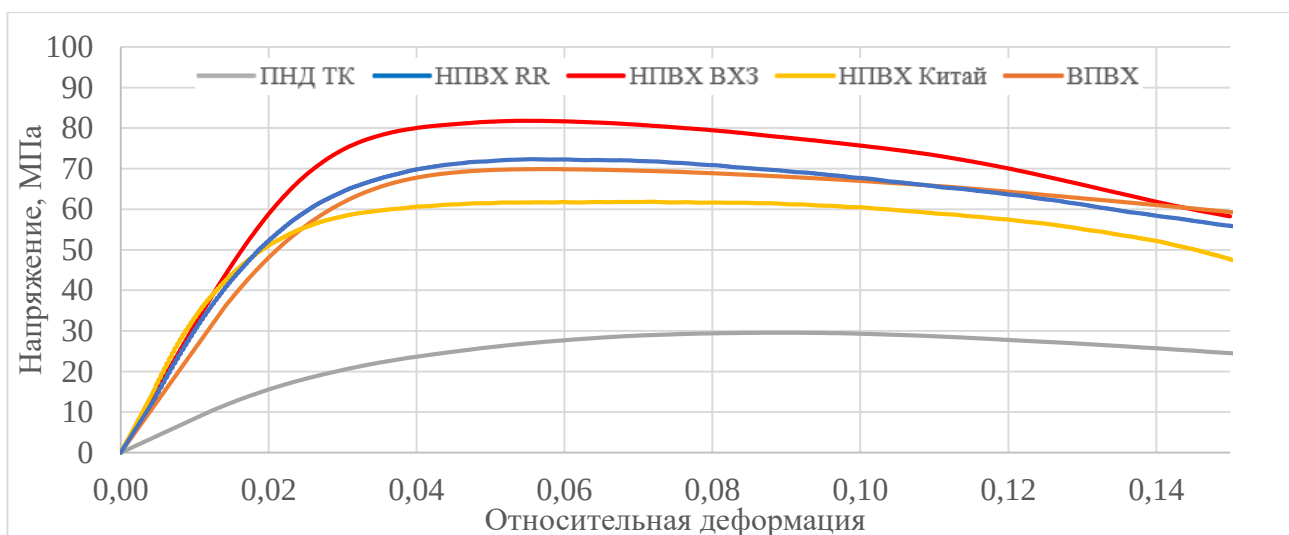


Рисунок 2.8 – Участки типовых кривые зависимостей «изгибающий момент / относительная деформация» при изгибе для различных материалов

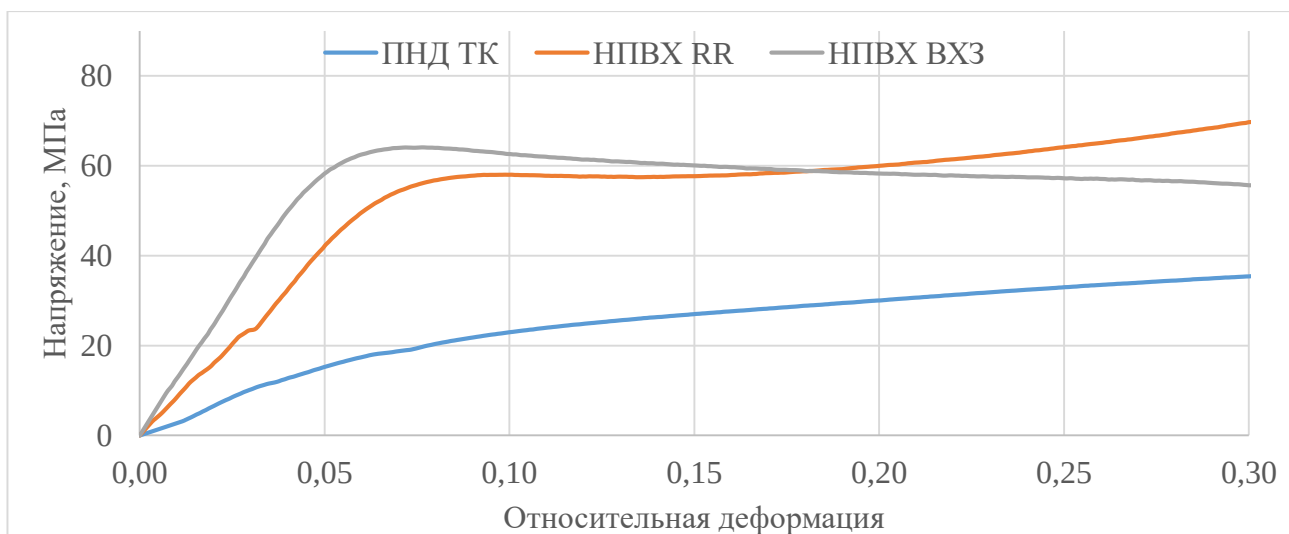


Рисунок 2.9 – Участки типовых диаграмм сжатия образцов из различных материалов

Сравнивая физико-механические характеристики первичных термопластов (НПВХ ВХЗ, НПВХ RR и НПВХ Китай), однозначно выделить лучший из трех не представляется возможным. С точки зрения прочностных показателей, НПВХ ВХЗ демонстрирует лучшие свойства, но обладает большей склонностью к водопоглощению. С точки зрения жесткостных параметров, жесткий ПВХ из Китая имеет заметное преимущество перед другими первичными термопластами, и менее подвержен абсорбции воды. Тем не менее, с позиции импортозамещения, наибольший интерес имеет отечественный НПВХ

На основании вышеизложенного, в дальнейшей работе в качестве ОКМ будет рассматриваться два материала:

1. ПНД – как термопласт, уже широко используемый в отрасли;
2. НПВХ ВХЗ – как перспективный термопласт, альтернативный полиэтилену низкого давления.

2.4 Определение минимальных требований к пластинам корпуса и балкам набора

Как было указано в п. 2.1, в Правилах зарубежных КО можно встретить два типа требований, в части минимальных размеров связей ККС:

- минимальный момент сопротивления балок набора – 15 см³ (Италия и Франция);
- минимальная толщина пластин корпуса – 10 мм (Франция).

Данные требования применяются для элементов СКК из ПНД, но требуют проверки на примерах реальных проектов судов и плавучих объектов. При этом, согласно п. 1.1.1. [32], Правила французского КО распространяются на все суда из термопластов, без минимальных ограничений по длине или скорости судна.

2.4.1 Требования к пластинам

В таблице 2.7 представлена статистика по 28 проектам судов из ПНД длиной от 3,0 до 10,2 м.

По представленным в таблице 2.7, можно однозначно заключить, что фактические толщины бортовой и днищевой обшивки меньше 10 мм. Распределение толщины бортовой и днищевой обшивки от длины судна представлены на рисунках 2.10 и 2.11 соответственно.

Анализ данных рисунков позволяет заключить, что для судов, длиной до 8 м, чаще всего встречается толщина наружной обшивки равная 8 мм. При этом, также встречаются проекты с толщиной обшивки 5-6 мм.

Таблица 2.7 – Данные по судам из ПНД

Проект	Главные размерения, м			Толщина, мм	
	Длина	Ширина	Высота борта	Бортовая обшивка	Днищевая обшивка
ПНД 300	3,00	1,10	0,40	6,00	6,00
Подъездок 34	3,46	1,23	0,50	6,00	8,00
K380	3,80	1,66	0,68	8,00	8,00
SWIMMER 370	3,80	1,48	0,61	5,00	5,00
Джонбот 400К	4,00	1,25	0,42	8,00	8,00
SWIMMER 400 Z	4,10	1,48	0,61	5,00	5,00
Киммерия 440DC	4,40	1,85	0,72	8,00	8,00
РЫБАК 440	4,40	1,55	0,70	6,00	8,00
K460 Classic	4,61	1,79	0,80	8,00	8,00
Jet 4500	4,65	1,60	0,62	8,00	10,00
SWIMMER 490	4,90	1,80	0,73	8,00	8,00
Жемчужина Сибири 460	5,00	1,74	0,76	8,00	8,00
K520 Classic	5,20	2,20	1,01	8,00	8,00
Север 520	5,20	2,08	0,95	8,00	10,00
Варяг 550Jet ST	5,42	2,05	0,90	10,00	10,00
СМП Бот 6000	5,90	2,30	1,12	8,00	8,00
D610 «ДОКЕР»	6,00	2,33	-	12,00	15,00
SFB-65	6,50	2,24	-	10,00	10,00
The A23 Flat Bottom Boat	7,00	2,44	-	9,50	9,50
D710 «ДОКЕР»	7,00	2,33	-	12,00	15,00
Макарак 750	7,50	1,40	0,59	8,00	8,00
The T1026 Work Barge	7,92	3,05	-	19,00	19,00
8.5m Work Punt	8,90	3,49	-	-	20,00
УРАЛОЧКА 2000	9,00	1,50	-	8,00	10,00
Tideman	9,22	2,70	1,90	15,00	15,00
E30 Rescue Patrol Boat	9,50	2,74	-	19,00	19,00
10m HDPE Work Boat	10,00	3,32	1,58	-	20,00
МРБ-10	10,20	3,65	-	15,00	15,00

С учетом изложенного, предлагается в качестве минимального ограничения для пластин наружной обшивки судна из ПНД принять 6 мм. Однако, данная рекомендация не может быть применена к судам из прочих термопластов, ввиду разных ФМХ материалов.

Как было указано выше, одной из задач назначения минимальных ограничений для пластин корпуса судна является обеспечение минимально необходимой жесткости пластины. Для того, чтобы связать толщину пластины и ФМХ материала, можно воспользоваться величиной цилиндрической жесткости пластины, определяемой по формуле (2:1):

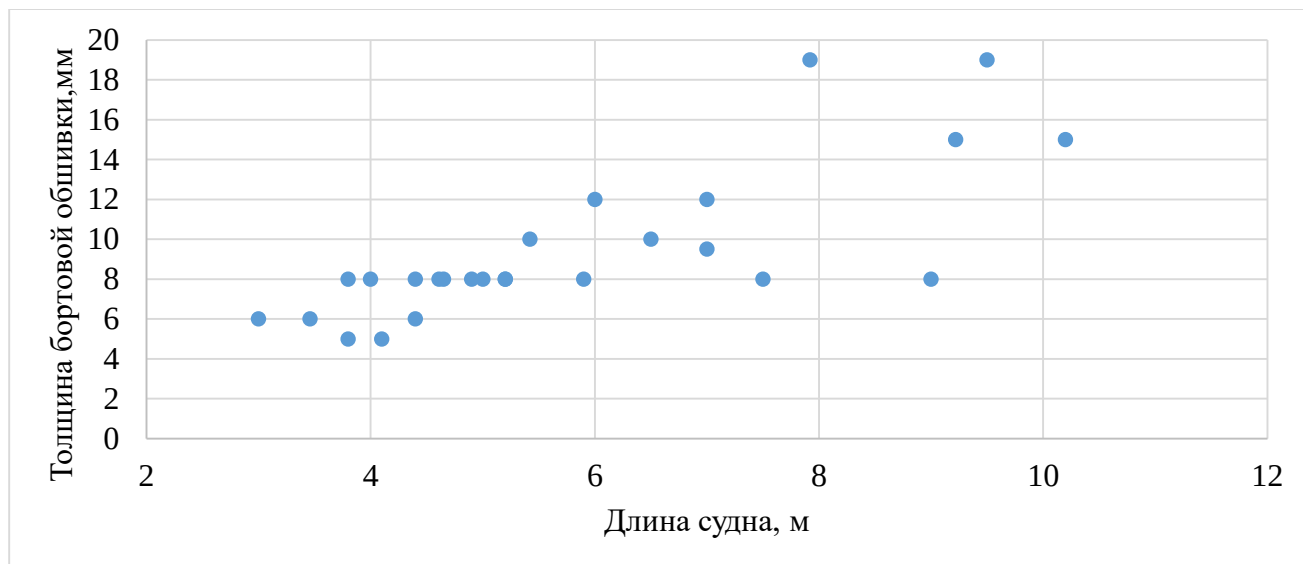


Рисунок 2.10 – Толщины бортовой обшивки судов в зависимости от длины судна

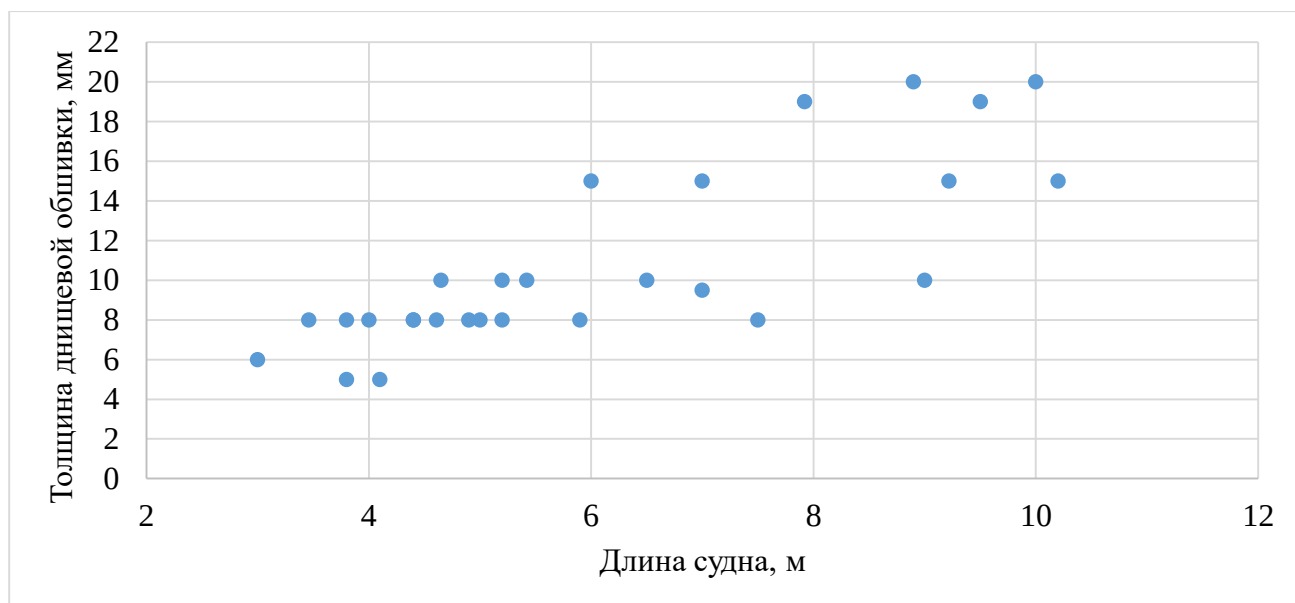


Рисунок 2.11 – Толщины днищевой обшивки судов в зависимости от длины судна

$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \mu^2)}, \quad (2.1)$$

где D – цилиндрическая жесткость пластины, Н·мм;

E – модуль упругости материала при изгибе, МПа;

t – толщина пластины, мм;

μ – коэффициент Пуассона материала.

Приняв модуль упругости и коэффициент Пуассона из таблицы 2.6, имеется возможность получить значение цилиндрической жесткости пластины из ПНД:

$$D_{\text{ПНД}} = \frac{Et^3}{12(1 - \mu^2)} = \frac{864 \cdot 6^3}{12(1 - 0,446^2)} = 19\,414 \text{ Н} \cdot \text{мм}.$$

Полученное значение цилиндрической жесткости соответствует предлагаемой минимальной толщине наружной обшивки из ПНД. Если принять данное значение аналогичным для пластин и из других термопластов, то с учетом их реальных ФМХ можно определить минимальное значение толщины наружной обшивки судна из прочих термопластов.

Так, для НПВХ ВХЗ (с учетом коэффициента Пуассона и модуля упругости, представленных в таблице 2.6), минимальная толщина будет равна:

$$t = \sqrt[3]{\frac{12D_{\text{ПНД}}(1 - \mu^2)}{E}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 19\,414 \cdot (1 - 0,337^2)}{3208}} = 4 \text{ мм}.$$

Таким образом, предлагается в качестве минимальной толщины наружной обшивки судна из НПВХ ВХЗ принять 4 мм.

2.4.2 Требования к балкам набора

Итальянское и французское КО предлагают принять в качестве ограничения, для балок набора с присоединенным пояском, минимальное значение момента сопротивления, равное 15 см^3 . При этом, согласно тем же Правилам, ширина присоединенного пояска принимается равной шпации.

Проверка корректности данного требования выполнена на двух проектах судов ИП Краснопрошин М.В. Характеристики проектов судов представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Характеристики проектов судов ИП «Краснопрошин М.В.

Наименование	«Байда»	«Джонбот»
Длина, м	6530	4000
Ширина, м	1560	1250
Высота борта, м	660	420
Шпация, мм	420	600
Толщина бортовой обшивки, мм	10	8
Толщина днищевой обшивки, мм	10	8
Профиль балок набора	Полоса	Полоса
Толщина балок набора, мм	10	8
Высота балок набора, мм	50	40

Оба проекта лодок неоднократно построены и хорошо себя зарекомендовали в эксплуатации. Расчет моментов сопротивления балок набора представлен в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Расчет моментов сопротивления балок набора

	«Байда»		«Джонбот»	
	Балка	Поясок	Балка	Поясок
Горизонтальный размер, мм	10	420	8	600
Вертикальный размер, мм	50	10	40	8
Площадь, мм ²	500	4200	320	4800
Положение от оси сравнения, мм	35	5	28	4
Статический момент, мм ³	17500	21000	8960	19200
Переносный момент, мм ⁴	612500	105000	250880	76800
Собственный момент инерции, мм ⁴	104167	35000	42667	25600
Положение нейтральной оси, мм	8,19		5,50	
Момент инерции, мм ⁴	541294		241067	
Расстояние крайних точек от нейтральной оси, мм	8,19	51,81	5,50	42,50
Момент сопротивления, мм ³	66080	10448	43830	5672
Момент сопротивления, см ³	66,1	10,4	43,8	5,67

Согласно расчетам, минимальные моменты сопротивления балок набора для обоих проектов судов не превышают 11 см³, таким образом, требования ИКО к минимальному моменту сопротивления балок набора также не соблюдаются.

В качестве альтернативы нормирования минимального момента сопротивления, для балок набора корпуса судна, предлагается ограничить максимальное отношение высоты балки к ее толщине. Подобный критерий для стальных рамных балок набора присутствует как в Правилах РМРС (п. 1.7.3, [64]), так и в Правилах РКО (п. 2.3.20, часть I [54]).

Назначение данного критерия – обозначить такое максимальное отношение высоты рамной балки к ее толщине, при достижении которого имеется высокая вероятность потери устойчивости балки без применения дополнительных подкреплений. Согласно требованиям Правил РКО, данный критерий для стальных элементов определяется по формуле (2.2):

$$\frac{h}{t_{\text{РКО}}} = 80\sqrt{235/R_{eH}}, \quad (2.2)$$

где $\frac{h}{t_{\text{РКО}}}$ – максимальное отношение высоты рамной балки к ее толщине по Правилам РКО;

R_{eH} – предел текучести стали, МПа.

Согласно требованиям Правил РМРС, данный критерий определяется по формуле (2.3):

$$\frac{h}{t_{\text{РМРС}}} = 60\sqrt{\eta}, \quad (2.3)$$

где $\frac{h}{t_{\text{РМРС}}}$ – максимальное отношение высоты рамной балки к ее толщине по Правилам РМРС;

η – коэффициент использования механических свойств стали, определяемый в зависимости от предела текучести, согласно п. 1.1.4.3 [64].

Таким образом, можно заметить, что рассматриваемый критерий нормируется одинаковым образом в обоих КО, но значение самого критерия отличается – в формулах (2.2) и (2.3) подкоренное выражение похожее, но множитель перед корнем разный. Кроме того, аналогичным образом выполнить пересчет рассматриваемого критерия на термопласты не представляется возможным ввиду того, что подкоренное выражение в обоих формулах уже адаптировано под сталь.

В то же время, если воспользоваться рекомендациями строительных норм и правил (п. 8.5.1 [65]), расчет максимального отношения высоты к толщине балки можно представить в более универсальном виде по формуле (2.4):

$$\frac{h}{t_{\text{СНиП}}} = \frac{\lambda}{\sqrt{R_{eH}/E}} \quad (2.4)$$

где $\frac{h}{t_{\text{СНиП}}}$ – максимальное отношение высоты балки к ее толщине по СНиП;

E – модуль упругости при сжатии, МПа;

λ – условная гибкость стенки, определяемая по таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Определение условной гибкости стенки

Условная гибкость стенки	Применение
3,5	При отсутствии местного напряжения в балках с двусторонними поясными швами
3,2	При отсутствии местного напряжения в балках с односторонними поясными швами
2,5	При наличии местного напряжения в балках с двусторонними поясными швами

Формула (2.4) является более универсальной, поскольку в подкоренном выражении представлены общие ФМХ материала.

Ввиду того, что физический смысл численных значений «80» и «60» в формулах (2.2) и (2.3) соответственно неизвестен, имеется возможность с помощью формулы (2.4) оценить корректность формул Правил РМРС и РКО.

Если принять, что рассматривается расчет балки из стали с пределом текучести 235 МПа и модулем упругости $2,1 \cdot 10^5$ МПа, то критическое отношение высоты балки к ее толщине по Правилам РКО составит 80, а по Правилам РМРС – 60. В таком случае, имеется возможность определить условную гибкость стенки для каждого случая:

$$\lambda_{\text{РКО}} = \frac{h}{t_{\text{РКО}}} \sqrt{R_{eH}/E} = 80 \cdot \sqrt{235/2,1 \cdot 10^5} = 2,7;$$

$$\lambda_{\text{РМРС}} = \frac{h}{t_{\text{РМРС}}} \sqrt{R_{eH}/E} = 60 \cdot \sqrt{235/2,1 \cdot 10^5} = 2,0.$$

Полученные значения условных гибкостей стенок балок сопоставимы с рекомендациями таблицы 2.10, как следствие, имеют одинаковый физический смысл, но разное нормирование. При этом, нормирование РМРС строже, чем РКО.

С учетом изложенного, с помощью формулы (2.4) имеется возможность определить максимальное отношение высоты балки к ее толщине и для рассматриваемых термопластов – для ПНД и НПВХ ВХЗ. Условная гибкость стенки принята по аналогии с требованиями Правил РКО, равной 2,00, предел текучести и модуль упругости при сжатии приняты по таблице 2.6:

$$\frac{h}{t_{\text{ПНД}}} = \frac{\lambda_{\text{РКО}}}{\sqrt{R_{eH}/E}} = \frac{2,00}{\sqrt{15,1/306}} = 9,0;$$

$$\frac{h}{t_{\text{НПВХ}}} = \frac{\lambda_{\text{РКО}}}{\sqrt{R_{eH}/E}} = \frac{2,00}{\sqrt{64,7/1162}} = 8,5.$$

Для обоих термопластов максимальное отношение высоты балки к толщине принято равным 9,0.

Таким образом, в качестве минимальных требований к элементам ККС принимаются:

1. минимальная толщина наружной обшивки – 6,0 мм для ПНД и 4,0 мм для НПВХ ВХЗ (в случае использования других термопластов, данная величина пересчитывается через цилиндрическую жесткость пластины);
2. максимальное отношение высоты балки к ее толщине – 9,0 для ПНД и НПВХ ВХЗ (в случае использования других термопластов, данная величина пересчитывается через условную гибкость стенки балки).

2.5 Выбор конститутивной модели материала для выполнения проверочных расчетов прочности

Предварительное проектирование конструкции корпуса судна (II этап, см. рисунок 2.1) осуществляется с помощью известных принципов и методов, применимых к расчету стальных конструкций.

Для окончательного проектирования элементов конструкции корпуса (III этап проектирования) требуется СКММ, описывающая его реальные физико-механические свойства, в частности:

1. нелинейное поведение материала при больших деформациях;
2. нелинейные вязкоупругие свойства;
3. влияние скорости нагружения на ФМХ материала;
4. влияние температурных условий на ФМХ материала;
5. разное поведение материала при растяжении и сжатии и пр.

Для выбора подходящей СКММ выполнен анализ научно-технического задела в части моделирования ФМХ термопластов и выполнения расчетов прочности.

В статье [66], исследуются работа двух видов термопластов (иономера этилен-сополимера и полиметилметакрилата) при царапании. В статье описаны проведение экспериментальных исследований (сжатие по протоколу «Зиккурат»), разработка модели материала и сравнение результатов конечно-элементного моделирования нанесения царапины по материалам с экспериментальными данными. Из особенностей поведения материалов учитывалась вязкоупругость материалов при сжатии на различных скоростях. В качестве конститутивной модели рассматривалась трехсетевая модель материала (ТММ). Использование ТММ демонстрирует хорошую сходимость между экспериментальными и расчетными данными, но расхождение увеличивается с ростом нагрузки.

В статье [67] описывается особенность учета поведения различных резиноподобных материалов при больших деформациях с учетом нелинейности свойств. Авторами предложена новая конститутивная модель материалов, называемая «восьмицепочной моделью». Модель предполагает, что материал состоит из кубической элементарной ячейки, в которой восемь полимерных цепей соединяют центр куба с его восемью вершинами. На рисунке 2.12 представлено изображение такой ячейки в недеформированном, растянутом и сжатом состоянии. Использование предлагаемой модели материала позволило достаточно точно моделировать поведение материалов при больших деформациях, в связи с чем, данная модель часто является составной частью иных, более сложных конститутивных моделей материалов.

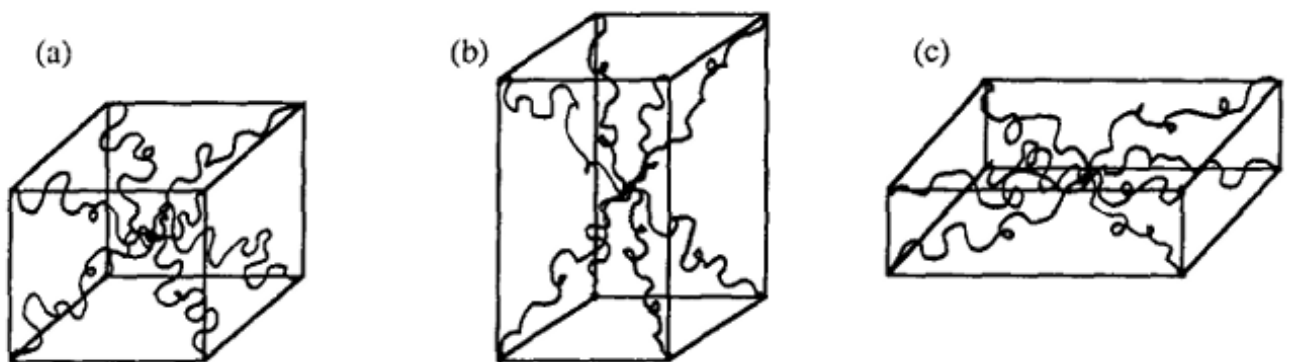


Рисунок 2.12 – «Восьмицепочная модель» Арруды-Бойса в недеформированном (а), растянутом (b) и сжатом (с) состояниях [67]

В труде [68] предлагается новая конститутивная модель материала для сверхвысокомолекулярного полиэтилена. При разработке модели учитывалась работа материала на растяжение, сжатие при различных скоростях нагружения, циклическое нагружение

растяжение/сжатие также при различных скоростях нагружения. Все испытания выполнялись при комнатной температуре. Моделирование ФМХ материала выполнено с помощью различных конститутивных моделей материала – рассматривались ТММ, модель Бергстрёма-Бойса, модель пластичности с кинематическим упрочнением, модель пластичности с изотропным упрочнением. Результаты моделирования показали наибольшую сходимость с экспериментальными данными при использовании ТММ (средняя сходимость более 97%).

В статье [69] рассматривается работа ПНД и НПВХ на базе испытаний на растяжение и сжатие при различных скоростях. ФМХ материала моделируются модифицированной моделью стандартного линейного тела, состоящей из модели упругого тела и модели Максвелла, соединённых параллельно. Использование подобной модели материала показало корректные результаты как на воспроизводимости испытаний на растяжение и сжатие, так и при моделировании испытания на изгиб.

Помимо описанных, имеются и прочие работы, с моделирование ФМХ термопластов. В работах рассматривается использование разнообразных конститутивных моделей термопластов, поэтому единого подхода в данном вопросе не прослеживается. Тем не менее, большая часть рассмотренных работ относится к применению трехсетевой модели материала.

На основании вышеизложенного, данная модель материала принята в качестве расчетной. Реологическая модель ТММ представлена на рисунке 2.13.

В данной модели сеть А и сеть В представляют собой последовательное соединение нелинейной гиперупругой пружины модели Арруды-Бойса с температурной зависимостью, а также нелинейного вязкопластического демпфера с заданным порогом текучести. Сеть С представляет собой модифицированную гиперупругую пружину модели Арруды-Бойса с температурной зависимостью и зависимостью от второго инварианта тензора деформаций.

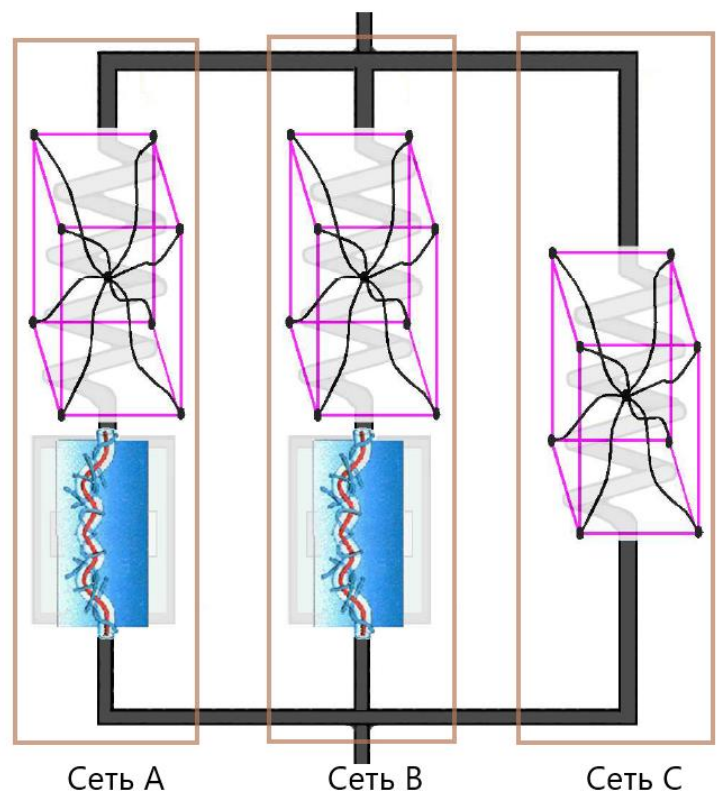


Рисунок 2.13 – Реологическая модель рассматриваемой ТММ [68]

С учетом изложенного, работа рассматриваемой модели материала описывается 3 ключевыми уравнениями:

1. уравнение восьмицепочной модели Арруды-Бойса [67] с температурной зависимостью, применяемое для упругих элементов сети А и В и записываемое в виде формулы (2.5):

$$\sigma = \frac{\mu}{J\bar{\lambda}^*} \left[1 + \frac{\theta - \theta_0}{\hat{\theta}} \right] \frac{\zeta^{-1}(\bar{\lambda}^*/\lambda_L)}{\zeta^{-1}(1/\lambda_L)} \text{dev}[b^*] + k(J - 1)\mathbf{1}, \quad (2.5)$$

где σ – напряжение Коши;

μ – модуль сдвига;

J – детерминант упругой части деформации (характеризует изменение объема тела);

$\bar{\lambda}^*$ – усредненное удлинение молекулярной цепи [70];

λ_L – предельное удлинение молекулярной цепи;

θ – расчетная температура;

θ_0 – базовая температура, соответствующая модулю сдвига;

$\hat{\theta}$ – температурный коэффициент, характеризующий скорость изменения модуля сдвига;

ζ^{-1} – обратная функция Ланжевена;

k – модуль объемной упругости;

$\text{dev}[b^*]$ – девиатор левого тензора Коши-Грина упругой деформации.

В уравнении (2.5) первое слагаемое отражает девиаторную деформацию (отвечающую за изменение формы тела), а второе – объемную деформацию (характеризует изменение объема тела).

Значение $\bar{\lambda}^*$ определяется через первый инвариант тензора Коши-Грина (I_1^*) по формуле (2.6):

$$\bar{\lambda}^* = \sqrt{\frac{I_1^*}{3}}. \quad (2.6)$$

Уравнение (2.5) применимо к упругим элементам сетей А и В, но с учетом некоторых изменений. Если модуль сдвига сети А может задаваться в качестве исходных данных, то модуль сдвига сети В должен вычисляться, по достижению порога текучести сети А, по формуле (2.7):

$$\dot{\mu}_B = -\beta(\mu_B - \mu_{Bf})\dot{\gamma}_A, \quad (2.7)$$

где $\dot{\mu}_B$ – скорость изменения модуля сдвига сети В;

μ_B – текущий модуль сдвига сети В;

β – коэффициент скорости изменения модуля сдвига сети В;

μ_{Bf} – конечный модуль сдвига сети В;

$\dot{\gamma}_A$ – скорость пластического течения сети А.

2. Уравнение восьмицепочной модели Арруды-Бойса с температурной зависимостью и зависимостью от второго инварианта тензора деформаций, применяемое для упругого элемента сети С, записываемое в виде формулы (2.8):

$$\sigma = \frac{1}{1+q} \left\{ \frac{\mu_c}{J\bar{\lambda}^*} \left[1 + \frac{\theta - \theta_0}{\hat{\theta}} \right] \frac{\zeta^{-1}(\bar{\lambda}^*/\lambda_L)}{\zeta^{-1}(1/\lambda_L)} \text{dev}[b^*] + k(J-1) + q \frac{\mu_c}{J} \left[I_1^* b^* - \frac{2I_2^*}{3} \mathbf{1} - (b^*)^2 \right] \right\}, \quad (2.8)$$

где μ_c – модуль сдвига сети С;

q – относительный вклад I_2 в сеть С;

I_2^* – второй инвариант левого тензора Коши-Грина упругой деформации.

Зависимость от второго инварианта тензора деформаций позволяет точнее описывать форму деформаций, а не только ее величину. При этом, важнейшим элементом уравнения (2.8) является коэффициент q , отражающий весомость влияния второго инварианта. В случае, если $q = 0$, то уравнение (2.8) трансформируется в уравнение (2.5), и упругий элемент сети С становится аналогичным элементам сетей А и В.

Итоговое напряжение Коши получается суммированием напряжений сети А, В и С.

3. Уравнение, отражающее скорость пластического течения, применимое для демпферов сетей А и В, записываемое по формуле (2.9):

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \left(\frac{\tau}{\hat{\tau} + aR(p)} \right)^m \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^n, \quad (2.9)$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость вязкопластичного течения;

$\dot{\gamma}_0$ – константа, обеспечивающая согласование размерностей;

τ – фактическое напряжение в сети;

$\hat{\tau}$ – напряжение текучести сети;

a – коэффициент, отражающий влияние среднего нормального напряжения на состояние текучести сети;

$R(p)$ – функция положительного линейного изменения среднего нормального напряжения (p). Предполагает, что если $p \leq 0$, то $R(p) = 0$; если $p > 0$, то $R(p) = p$.

m – коэффициент, отражающий чувствительность скорость течения от напряжения в сети;

n – коэффициент, отражающий влияние температуры на скорость течения.

Три представленных уравнения являются ключевыми, в понимании работы ТММ. При этом, для корректной работы модели, необходимо соблюдение двух условий, приставленных в формулах (2.10) и (2.11):

$$\mu_A > \mu_{Bi} > \mu_{Bf}, \quad (2.10)$$

$$\hat{\tau}_A < \hat{\tau}_B. \quad (2.11)$$

Данные условия предполагают:

1. сеть А должна быть более жесткой, чем сеть В;
2. сеть В со временем должна размягчаться, и ее жесткость обязана падать;
3. сеть А должна переходить в вязкотекучее состояние раньше, чем сеть В.

Перечень параметров, отражающих работу ТММ представлен в таблице 2.11.

Для определения численных значений параметров, представленных в таблице 2.11, требуется проведение серии дополнительных испытаний, с изучением вязкоупругих свойств материалов, а также влияния скорости и температуры нагружения.

Таблица 2.11 – Перечень параметров ТММ

№ п/п	Обозначение	Размерность	Описание
1	μ_A	МПа	Модуль сдвига сети А
2	$\hat{\tau}_A$	МПа	Напряжение текучести сети А
3	m_A	-	Коэффициент, отражающий чувствительность скорость течения от напряжения в сети А
4	μ_{Bi}	МПа	Начальный модуль сдвига сети В
5	μ_{Bf}	МПа	Конечный модуль сдвига сети В
6	β	-	Коэффициент скорости изменения модуля сдвига сети В
7	$\hat{\tau}_B$	МПа	Напряжение текучести сети В
8	m_B	-	Коэффициент, отражающий чувствительность скорость течения от напряжения в сети В
9	μ_C	МПа	Модуль сдвига сети С
10	q	-	Относительный вклад I_2 в сеть С
11	a	-	Коэффициент, отражающие влияние среднего нормального напряжения на состояние текучести сети
12	n	-	Коэффициент, отражающий влияние температуры на скорость течения
13	λ_L	-	Предельное удлинение молекулярной цепи
14	k	МПа	Модуль объемной упругости
15	$\hat{\theta}$	К	Температурный коэффициент, характеризующий скорость изменения модуля сдвига
16	θ_0	К	Базовая температура, соответствующая модулю сдвига

2.6 Вывод по главе 2

Предлагаемый алгоритм проектирования размеров связей ККС из термопластов состоит из 3 базовых этапов:

Этап I. Выбор материала. В рамках данного этапа, для отечественных КО разработан перечень требований к минимальным ФМХ термопластов, для его рассмотрения в качестве ОКМ. Для ПНД сформированы минимальные значения требуемых ФМХ. Данный перечень испытаний с указанием пороговых значений для ПНД получил одобрение для внедрения в Правила РМРС.

Рассмотрена альтернатива используемого в отрасли ПНД в виде НПВХ. Выполнена серия испытаний, с целью сравнения ФМХ материалов и установлено, что ФМХ НПВХ существенно лучше, чем у ПНД. В связи с этим, принято решение в дальнейшем рассматривать два вида материала:

1. ПНД – как термопласт, уже широко используемый в отрасли;
2. НПВХ производства компании ПАО «Владимирский химический завод» – как перспективный термопласт, (как альтернатива ПНД).

Этап II. Предварительное проектирование элементов ККС. На примере реальных судов из ПНД показано, что минимальные требования к размерам связей от ИКО на практике не обеспечиваются, в связи с чем, данные требования пересмотрены. Сформированы рекомендации по назначению минимальной толщины наружной обшивки корпуса, а также максимального соотношения высоты балки набора к ее толщине.

В рамках данного этапа выполняется подбор размеров связей аналитическим методом (при условии рассмотрения материала, как изотропного и линейно-упругого), с применением коэффициентов использования прочности II этапа. Данные коэффициенты должны учитывать различные особенности ФМХ термопластов, не учитываемые на данном этапе проектирования.

Этап III. Окончательное проектирование элементов ККС (выполнение проверочных расчетов). На данном этапе выполняются проверочные расчеты прочности с учетом реальных ФМХ материалов. Для моделирования особенностей термопластов требуется специальных конститутивная модель материалов, отражающая их ключевые особенности: вязкоупругие свойства, нелинейность при больших деформациях, влияние скорости нагружения и температуры материала на его ФМХ и пр. При этом, КИП, используемые на II этапе, должны быть изменены, ввиду фактического учета свойств материала в расчете.

Анализ научно-технического задела в части используемых СКММ для выполнения расчетов прочности показал, что единой модели материала, используемой для таких задач, нет. В связи с тем, что в большей части работ рассматривалось применение трехсетевой модели материала, данная модель выбрана в качестве расчетной. Представлены определяющие уравнения модели материалов и перечень параметров, требующих определения для функционирования модели.

На основании вышеизложенного, для возможности применения предлагаемой методики, необходимо обосновать КИП II и III этапов, а также определить коэффициенты определяющих уравнений трехсетевой модели материала, применительно к ПНД и НПВХ.

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНСТИТУТИВНОЙ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА

3.1 Анализ существующей практики нормирования прочности и жесткости судовых корпусных конструкций из термопластов

Среди КО МАКО, требования к допускаемым напряжениям и деформациям СКК представлены только в Правилах КО Италии и Франции.

3.1.1 Италия

Правила RINA [33], в части проектирования корпусных конструкций из ПНД, содержат требования к допускаемым напряжениям и деформациям как отдельных связей СКК, так и корпуса в целом.

Требования к допускаемым деформациям:

1. прогиб пластины при расчетном давлении не должен превышать 2,5% от шпации;
2. максимальный прогиб корпуса суда не должен превышать 1/150 длины судна в сечении любого шпангоута.

Значения допускаемых нормальных (касательных) напряжений формируются отношением предела текучести ПНД на растяжение (R_{eH}) (пределом прочности на сдвиг (τ_{eH})) на коэффициент запаса прочности. Для связей, воспринимающих нагрузки от общего изгиба, дополнительно вводится коэффициент (C_A), учитывающий положение рассматриваемого элемента ККС относительно кормового перпендикуляра.

Значения допускаемых напряжений представлены в таблице 3.1. Для удобства сравнения, определение допускаемых напряжений представлено через КИП – величину, обратную коэффициенту запаса прочности. КИП по нормальным напряжениям для отдельных связей корпуса варьируется в диапазоне 0,51-0,69, а для корпуса в целом составляет 0,70.

Таблица 3.1 – Допускаемые напряжения по Правилам RINA

Тип связи	Вид нагрузок	Допускаемое напряжение
Пластины	Динамические	$\sigma = 0,69 \cdot R_{eH}$
	Квазистатические	$\sigma = 0,62 \cdot R_{eH}$
Балки в целом (рамные и холостые)	От общего изгиба	$\sigma = 0,51 \cdot R_{eH} \cdot C_A$
	Не воспринимающие общий изгиб	$\sigma = 0,51 \cdot R_{eH}$
	Для всех	$\tau = 0,83 \cdot \tau_{eH}$
Балки переборок (рамные и холостые)	-	$\sigma = 0,69 \cdot R_{eH}$
	-	$\tau = 0,95 \cdot \tau_{eH}$
Корпус в целом	От общего изгиба	$\sigma = 0,70 \cdot R_{eH}$
	От общего изгиба	$\tau = 0,70 \cdot \tau_{eH}$

3.1.2 Франция

В Правилах BV [32] отсутствуют требования к допускаемым деформациям, но есть требования к допускаемым напряжениям.

Для определения допускаемых напряжений Правила [32] ссылаются на следующие документы:

1. NR600: Конструкция корпуса и общее расположение для классификации грузовых судов длиной менее 65 м и негрузовых судов длиной менее 90 м;
2. NR500: Правила классификации и сертификации яхт;
3. NR217: Правила классификации судов внутреннего водного транспорта.

Ввиду того, что практически все суда и плавучие объекты из термопластов относятся к малотоннажному флоту, и не предполагают сложных условий эксплуатации, в качестве источника для выбора значений допускаемых напряжений приняты Правила NR217 [71].

Согласно части В, главе 2, раздела 6 Правил [71], допускаемые напряжения определяются перемножением КИП на предел текучести материала на растяжение, в зависимости от типа рассматриваемой связи и условий их работы. Значения допускаемых напряжений представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Допускаемые напряжения по Правилам BV

Вил нагрузок	Тип связи	Допускаемое напряжение
Местное внутреннее давление или давление со стороны моря/реки	Пластины	$\sigma = 0,45 \cdot R_{eH}$
	Холостые балки набора	$\sigma = 0,50 \cdot R_{eH}$
		$\tau = 0,30 \cdot R_{eH}$
	Рамные балки набора	$\sigma = 0,55 \cdot R_{eH}$
		$\tau = 0,30 \cdot R_{eH}$
		$\sigma_{Mis} = 0,55 \cdot R_{eH}$
Нагрузки от затопления	Пластины	$\sigma = 0,50 \cdot R_{eH}$
	Холостые балки набора	$\sigma = 0,55 \cdot R_{eH}$
		$\tau = 0,30 \cdot R_{eH}$
	Рамные балки набора	$\sigma = 0,55 \cdot R_{eH}$
		$\tau = 0,30 \cdot R_{eH}$
		$\sigma_{Mis} = 0,55 \cdot R_{eH}$
Пробные нагрузки	Пластины	$\sigma = 0,60 \cdot R_{eH}$
	Холостые балки набора	$\sigma = 0,65 \cdot R_{eH}$
		$\tau = 0,35 \cdot R_{eH}$
	Рамные балки набора	$\sigma = 0,70 \cdot R_{eH}$
		$\tau = 0,40 \cdot R_{eH}$
		$\sigma_{Mis} = 0,70 \cdot R_{eH}$

Использование отдельных допускаемых нормальных (σ) и касательных (τ) напряжений относятся к случаю рассмотрения изолированных балок. В случае, когда балка не может быть

посчитана изолировано, должен быть выполнен расчет стержневой системы, при этом оценка достаточной прочности определяется величиной допускаемых напряжений по Мизесу (σ_{Mis}).

Из представленной таблицы следует, что при эксплуатационных нагрузках КИП для нормальных напряжений по отдельным связям варьируется в диапазоне 0,45-0,55, что немного ниже, чем у Правил Италии. Требования к КИП корпуса в целом отсутствуют.

3.2 Выбор исследуемых свойств термопластов

При рассмотрении термопластов как линейно-упругого изотропного материала предполагается, что особенности их ФМХ не учитываются в расчете, а фигурируют в назначении КИП. В связи с этим, возникает вопрос о достаточности КИП, предлагаемых зарубежной практикой.

В случае, если их значение обосновано и в должной мере обеспечивает учет ключевых особенностей термопластов, данные коэффициенты могут быть использованы как КИП II этапа для выполнения предварительного проектирования размеров связей СКК, согласно предлагаемой методике (II этап, см. рисунок 2.1.). В противном случае, значения должны быть пересмотрены.

Таким образом, для назначения КИП II этапа должны быть исследованы следующие факторы:

1. изотропия свойств;
2. физическая нелинейность;
3. вязкоупругие свойства;
4. влияние скорости нагружения на ФМХ материала;
5. влияние температуры на ФМХ материала;
6. влияние фотодеструкции на ФМХ материала;
7. влияние сварки на ФМХ материала.

Данный перечень не является исчерпывающим, однако обеспечивает учет ключевых свойств термопластов. По результатам выполненных исследований, помимо назначения КИП II этапа, появится возможность определения КИП III этапа для выполнения проверочных расчетов прочности (III этап, см. рисунок 2.1.). Для этого требуется исключить из рассмотрения те свойства материалов, которые будут учтены непосредственным образом в СКММ. В таблице 3.3. представлены пояснения к выбору КИП обоих этапов.

Учет каждого из представленных в таблице свойств выполнен посредством введения определенного коэффициента учета. Произведение каждого из введенных коэффициентов позволяет определить итоговые значения КИП II и III этапов.

Таблица 3.3 – Учет свойств термопластов при назначениях КИП II и III этапов

Свойства материала	Учет в КИП II этапа	Учет в КИП III этапа
Изотропия	+	+
Физическая нелинейность	+	-
Ползучесть	+	-
Релаксация	+	-
Влияние скорости нагружения на ФМХ	+	-
Влияние температуры на ФМХ	+	-
Фотодеградация	+	+
Влияние сварки на ФМХ	+	+

3.3 Исследования свойств термопластов

Исследование свойств термопластов выполнено на двух материалах:

1. полиэтилен низкого давления производства компании ООО «Лада-Лист». Далее в работе данный материал будет обозначен как «ПНД ЛЛ»;
2. непластифицированный поливинилхлорид производства ПАО «Владимирский Химический Завод». Далее в работе данный материал будет обозначен как «НПВХ ВХЗ»;

Все испытания проводились в лабораторном комплексе НОЦ СМИТ КГТУ.

3.3.1 Исследование изотропии

Листовой ПНД, как и НПВХ, производится методом плоскощелевой экструзии. В связи с этим, уместен вопрос о наличии разницы в ФМХ материалов, изготовленных из листа вдоль и поперек направления экструзии – материал может быть или трансверсально-изотропным (ФМХ одинаковы в плоскости листа, но отличаются в направлении толщины), или ортотропным.

Обзор научных публикаций по данному вопросу свидетельствует, что ПНД может быть рассмотрен как трансверсально-изотропный [72-74], а НПВХ – как анизотропный [72].

Для проверки данного утверждения была изготовлена и испытана серия образцов на растяжение, сжатие и изгиб по ГОСТ 11262-2017 [75], ГОСТ 4648-2014 [76] и ГОСТ 4651-2014 [77] соответственно. Испытания выполнялись на поверенной испытательной машине РЭМ-50-А-1-2 при температуре 23,6°C и влажности 55%. Скорость проведения испытаний – 2 мм/мин. Определение каждой характеристики выполнено на 5 образцах. Свидетельства о поверке испытательного оборудования представлены в приложении А.

На листовых материалах ПНД и НПВХ отсутствует информация о направлении экструзии. В связи с этим, образцы были вырезаны в двух взаимно перпендикулярных направлениях с обозначением «направление 1» и «направление 2». Результаты испытаний представлены в таблице 3.4. Число перед чертой показывает значение для образцов, изготовленных в

«направлении 1», за чертой – для образцов в «направлении 2». Число в квадратных скобках в таблице отражает процент анизотропии по каждому из указанных параметров.

Таблица 3.4 – Результаты исследования изотропии ПНД и НПВХ

Характеристика	ПНД ЛЛ	НПВХ ВХЗ
Растяжение		
Предел текучести, МПа	20,67 / 20,95 [1,38 %]	57,2 / 45,7 [20,1 %]
Модуль упругости, МПа	717 / 735 [2,56 %]	3289 / 2767 [15,9 %]
Изгиб		
Предел прочности, МПа	31,18 / 31,45 [0,87 %]	95,9 / 90,7 [5,76 %]
Модуль упругости, МПа	683 / 701 [2,59 %]	3273 / 3192 [2,55 %]
Сжатие		
Предел текучести, МПа	19,5 / 20,3 ($\sigma_{0,05}$) [4,19 %]	64,7 / 62,6 [3,35 %]
Модуль упругости, МПа	580 / 585 [0,87 %]	1162 / 1201 [3,36 %]

Данные, представленные в таблице 3.4, подтверждают, что ПНД можно рассматривать как трансверсально-изотропный материал. Данные по НПВХ свидетельствуют о наличии ортотропии до 20%.

На основании выполненных испытаний, для ПНД ЛЛ коэффициент учета не требуется ($K_{из1} = 1,00$), а для НПВХ ВХЗ принимается равным $K_{из2} = 0,90$.

3.3.2 Исследование физической нелинейности

При проектировании СКК ИКО рассматривают термопласт как изотропный и линейно-упругий материал. В связи с этим, целесообразно оценить наличие нелинейной зависимости между напряжением и деформациями (физическая нелинейность) при различных видах нагружения. Оценка физической нелинейности выполнена до напряжений, соответствующих 0,5 от предела текучести (для растяжения и сжатия) или предела прочности (для изгиба). Нижнюю границу диапазона было принято ограничить 2 МПа, за счет чего удалось исключить начальный участок диаграммы, при котором происходит выборка захватов испытательной машины, обжатие образца и другие переходные процессы.

Анализ начальных участков диаграмм выполнен на графиках, полученных в результате испытаний по п. 3.3.1. Типовые начальные участки диаграмм, полученные при испытаниях на растяжение, представлены на рисунке 3.1, при испытаниях на изгиб – на рисунке 3.2, при испытаниях на сжатие – на рисунке 3.3.

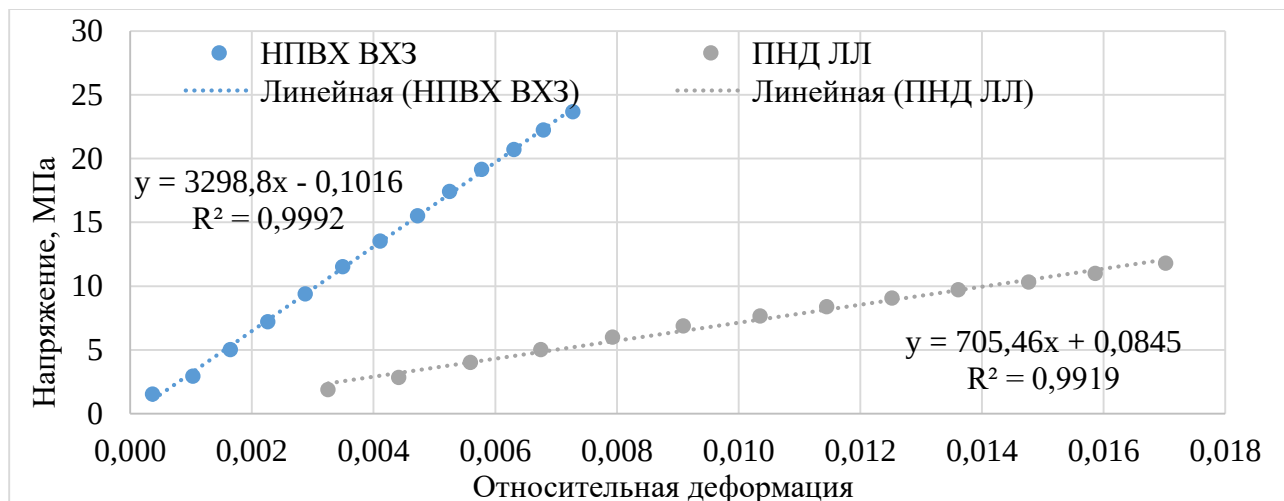


Рисунок 3.1 – Типовые начальные участки диаграмм растяжения

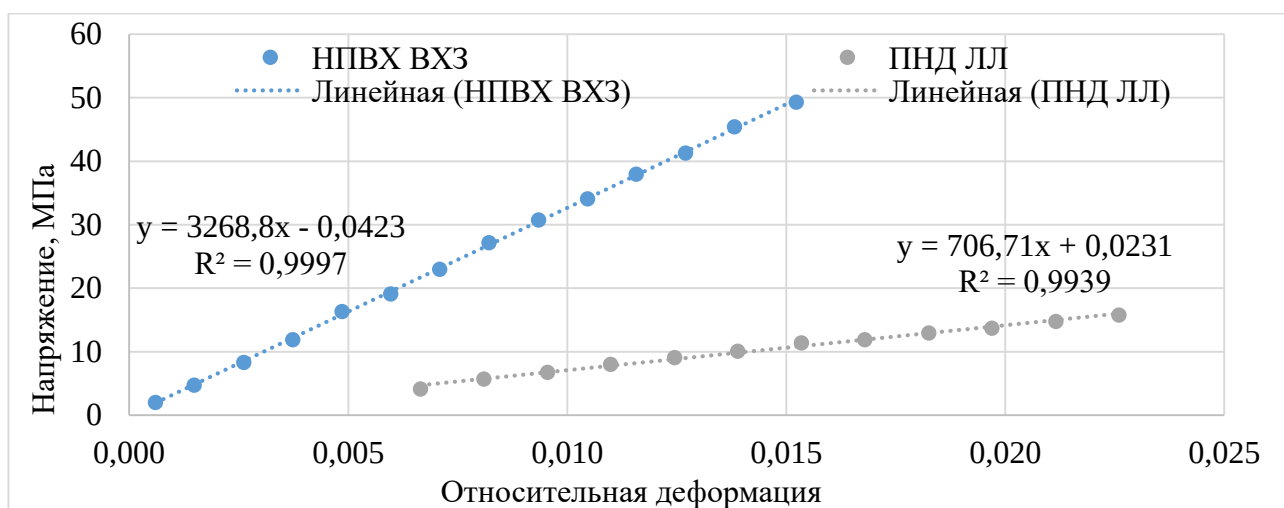


Рисунок 3.2 – Типовые начальные участки кривых зависимости изгибающего напряжения от относительной деформации при изгибе

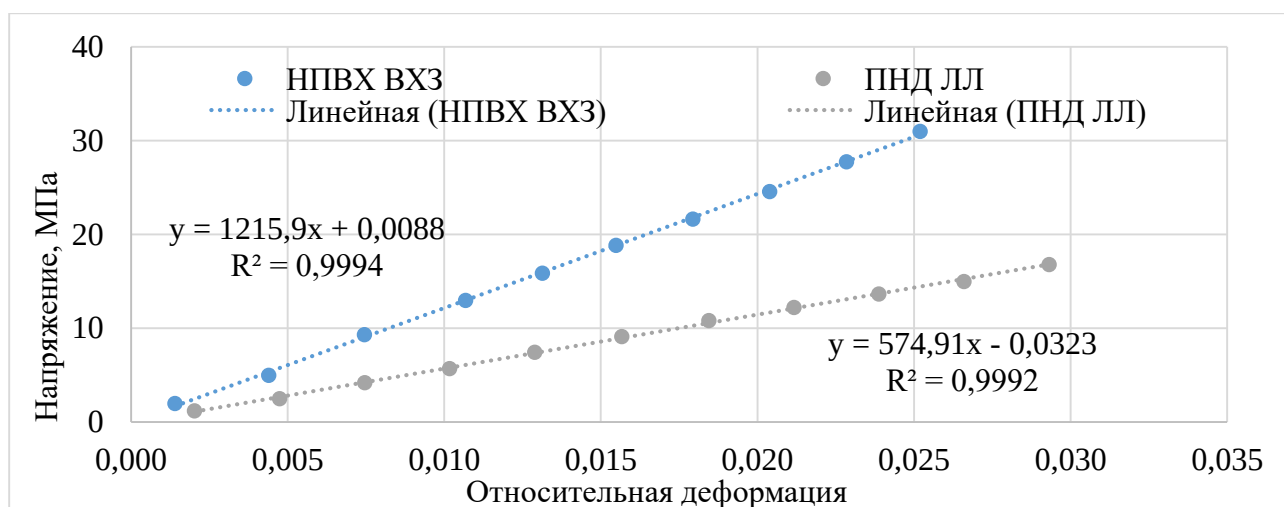


Рисунок 3.3 – Типовые начальные участки диаграмм сжатия

По представленным рисункам видно, что начальные участки диаграмм, по всем материалам и видам рассмотренных испытаний, соответствуют линейной зависимости с достаточно высоким коэффициентом корреляции. В связи с этим, **введение коэффициентов учета не для НПВХ ВХЗ, не для ПНД ЛЛ не требуется ($K_{\Phi H1} = K_{\Phi H2} = 1,00$).**

3.3.3 Исследование вязкоупругих свойств

Вязкоупругость свойственна большинству термопластичных материалов, и ПНД с НПВХ не являются исключением [78-81]. Однако, количественных данных по вязкоупругим свойствам рассматриваемых отечественных термопластов найти не удалось.

В связи с этим, вязкоупругие свойства ПНД ЛЛ и НПВХ ВХЗ были изучены посредством проведения серии испытаний на ползучесть и релаксацию

Испытание на релаксацию заключается в приложении к образцу постоянного значения определенной деформации и фиксирования изменения напряжения в образце в течение времени. Эксперимент проводился путем приложения к образцам по ГОСТ 11262-2017 [75] растягивающей нагрузки на вышеупомянутой испытательной машине РЭМ-50-А-1-2, в пять ступеней нагружения. Семейство кривых релаксации для НПВХ ВХЗ представлено на рисунке 3.4, для ПНД ЛЛ – на рисунке 3.5. Время выдержки образцов на каждой ступени нагружения – 3600 секунд (1 час). Испытание проводилось при температуре 24,5 °С и влажности 43%.

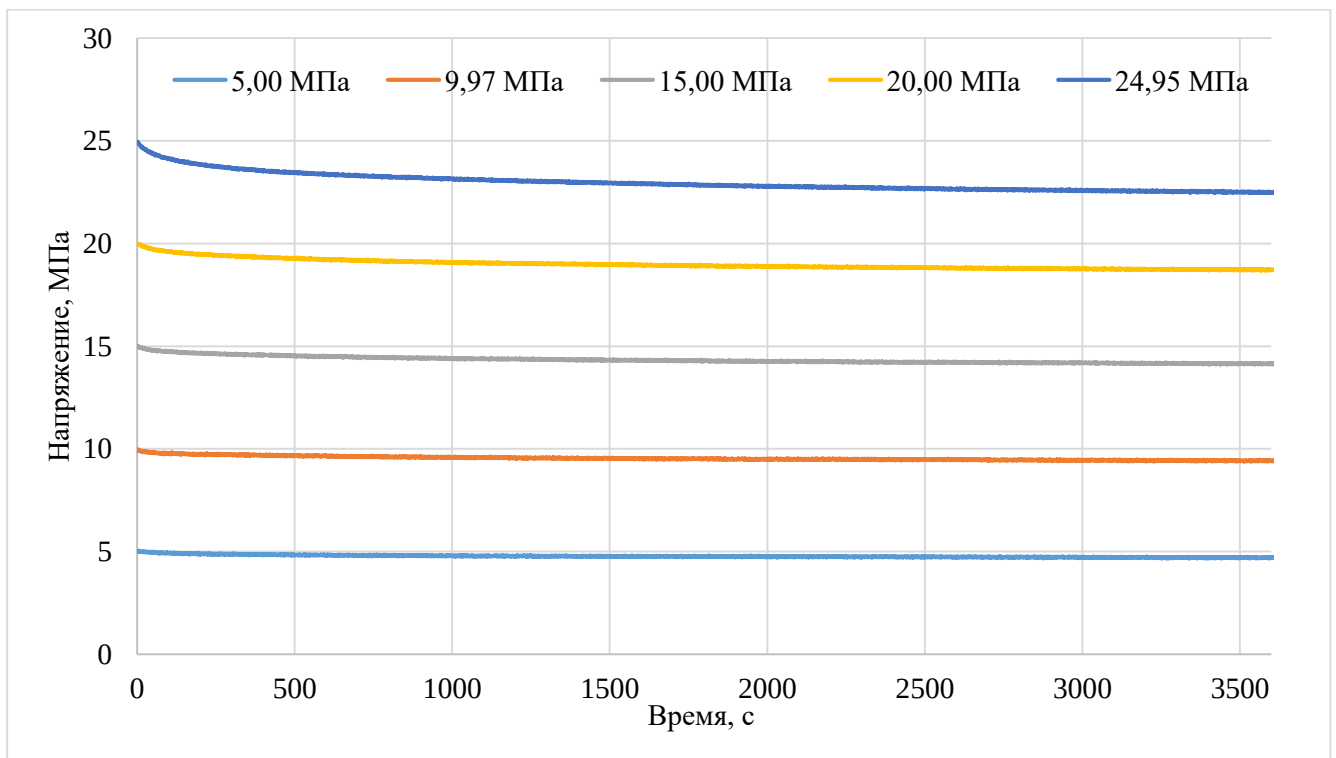


Рисунок 3.4 – Кривые релаксации для НПВХ ВХЗ

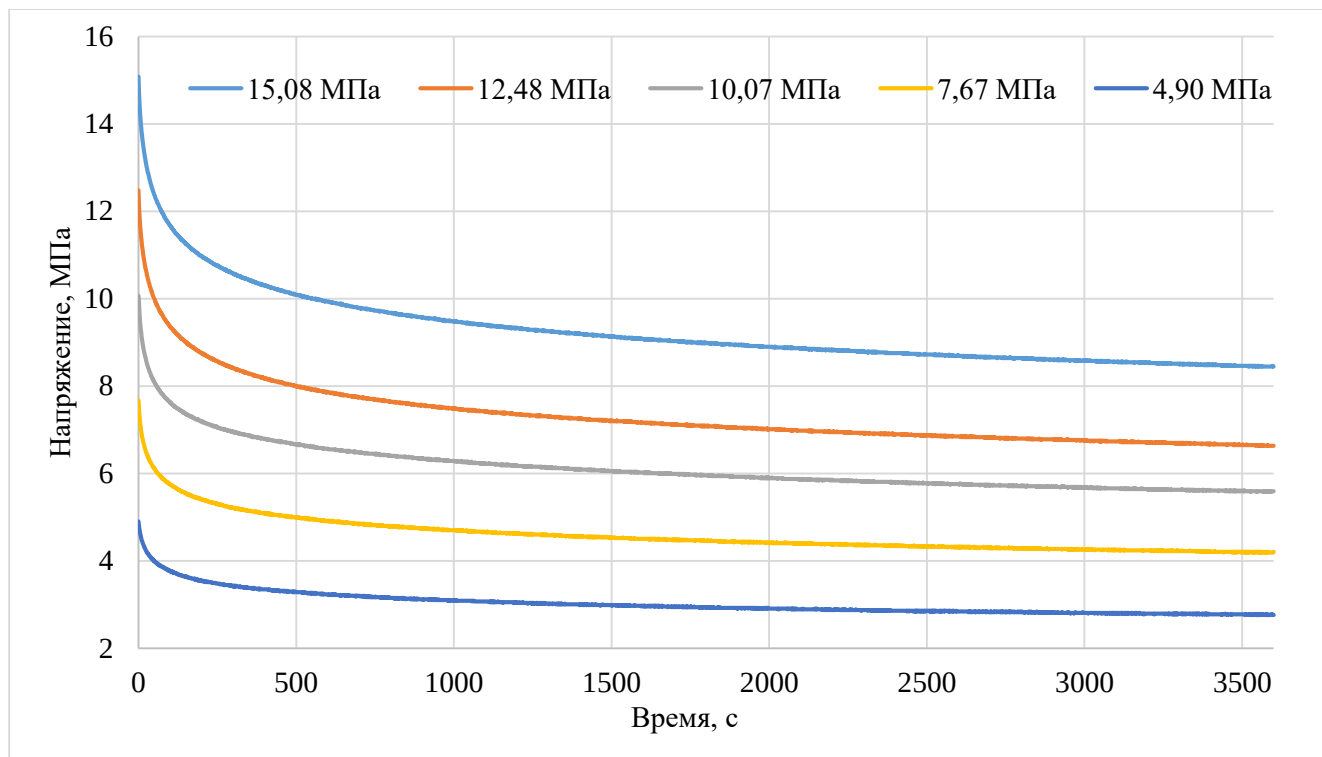


Рисунок 3.5 – Кривые релаксации для ПНД ЛЛ

Для оценки вязкоупругих свойств материалов была проанализирована величина падения напряжения на каждой ступени нагружения в течении всего времени выдержки: чем больше падает напряжение за установленное время, тем существеннее проявляются вязкоупругие свойства. В таблице 3.5 представлено значение падения напряжения по каждой ступени в процентах.

Таблица 3.5 – Падение напряжения на каждой ступени нагружения за 3600 с

№ ступени	НПВХ ВХЗ			ПНД ЛЛ		
	σ_0 , МПа ($t = 0$ с)	σ_t , МПа ($t = 3600$ с)	Δ , %	σ_0 , МПа ($t = 0$ с)	σ_t , МПа ($t = 3600$ с)	Δ , %
1	24,95	22,48	9,90	15,08	8,45	43,97
2	20,00	18,70	6,50	12,48	6,63	46,88
3	15,00	14,15	5,67	10,07	5,59	44,49
4	9,97	9,40	5,72	7,67	4,21	45,11
5	5,00	4,71	5,80	4,90	2,76	43,67

Результаты испытаний на релаксацию однозначно свидетельствуют о том, что полиэтилен низкого давления имеет более выраженные релаксационные свойства, чем непластифицированный поливинилхлорид. Падение напряжений только за один час может достигать почти половины от начального уровня напряжений.

Испытание на ползучесть заключается в приложении к образцу материала постоянного значения усилия и фиксирования изменения удлинения в образце в течение времени. Испытание проводилось по ГОСТ 18197-2014 [82].

Нагружение образца выполнялось набором лабораторных грузов, подвешиваемых к образцу за счет специального захвата. Удлинение образца фиксировалось с помощью установленного в рамках рабочей части контактного экстензометра на базе, размером 57 мм. Испытания проводились при температуре 23,4°C и влажности 58%. Каждый материал испытан на 5 различных ступенях нагружения с выдержкой нагрузки на каждой ступени в течении 3600 с.

Семейство кривых ползучести для НПВХ ВХЗ представлено на рисунке 3.6, для ПНД ЛЛ – на рисунке 3.7. Для количественной оценки в таблице 3.6 представлены данные по абсолютному удлинению образцов в течении часа испытаний. С учетом начальной длины рабочего участка, равной 57 мм, определено также относительное удлинение образцов.

Представленные данные наглядно демонстрируют выраженную ползучесть у полиэтилена, и менее существенную, у непластифицированного поливинилхлорида, следовательно, данные свойства должны быть учтены в КИП II этапа.

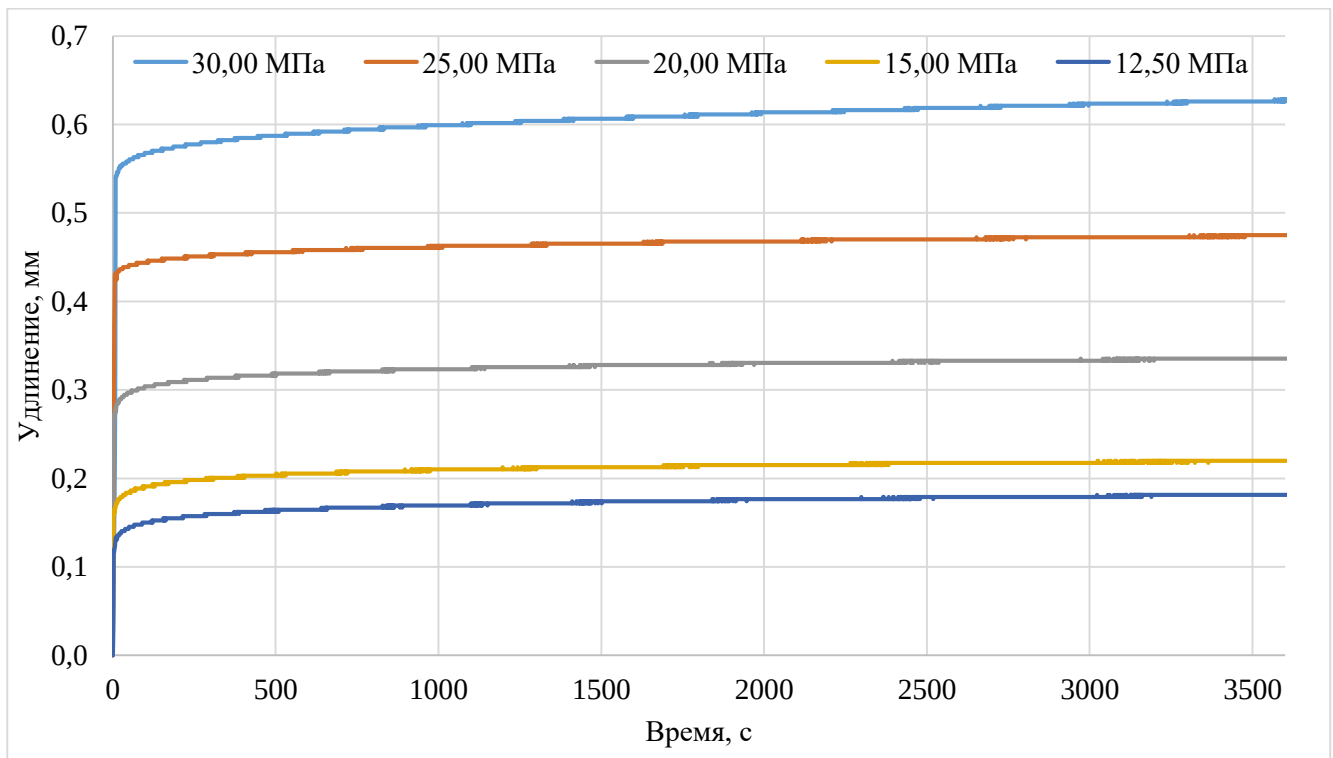


Рисунок 3.6 – Кривые ползучести для НПВХ ВХЗ

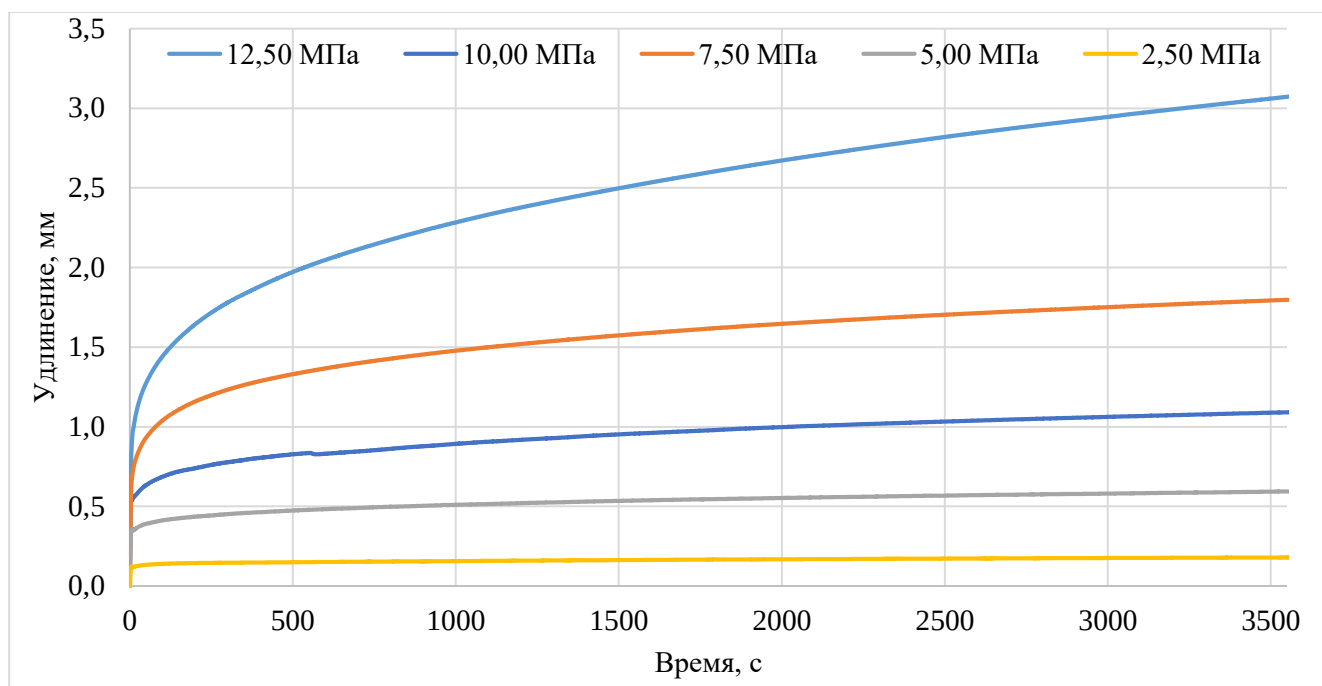


Рисунок 3.7 – Кривые ползучести для ПНД ЛЛ

Таблица 3.6 – Удлинение образцов на каждой ступени нагружения за 3600 с

№ ступени	НПВХ ВХЗ			ПНД ЛЛ		
	σ_0 , МПа	Δl , мм ($t = 3600$ с)	ε , %	σ_0 , МПа	Δl , мм ($t = 3600$ с)	ε , %
1	30,00	0,63	1,10	12,50	3,08	5,41
2	25,00	0,47	0,83	10,00	1,80	3,16
3	20,00	0,33	0,59	7,50	1,09	1,92
4	15,00	0,22	0,39	5,00	0,65	1,14
5	12,50	0,18	0,32	2,50	0,18	0,32

Учет вязкоупругих свойств в КИП II этапа для ПНД предлагается определять коэффициентом учета $K_{\text{Вяз1}} = 0,70$, а для НПВХ ВХЗ – $K_{\text{Вяз2}} = 0,95$.

3.3.4 Исследование влияния скорости нагружения на ФМХ термопластов

Скорость нагружения оказывает существенное влияние на ФМХ термопластов. В данном отношении имеется множество работ по ПНД [57, 83], но работ по НПВХ не было обнаружено.

В связи с этим, была выполнена серия испытаний обоих материалов на растяжение при различных скоростях нагружения по ГОСТ 11262-2017 [75]. Испытания выполнялись на испытательной машине РЭМ-50-А-1-2 при температуре 22,0°C и влажности 35%. На каждой скорости испытано по 5 образцов.

На рисунке 3.8 представлены участки типовых диаграмм растяжения для образцов из ПНД на различных скоростях нагружения до относительной деформации, соответствующей 14%, на

рисунке 3.9 – участки типовых диаграмм растяжения для образцов из НПВХ ВХЗ до достижения предела текучести. В таблице 3.7 представлены обобщенные результаты испытаний.

Если принять, что «базовые» значения ФМХ термопластов определяются при скорости нагружения 1,0 мм/мин (согласно [75], при данном скорости определяется модуль упругости материала на растяжение), то имеется возможность оценить процент отклонения значений, полученных на других скоростях. Результаты расчета представлены в таблице 3.8.

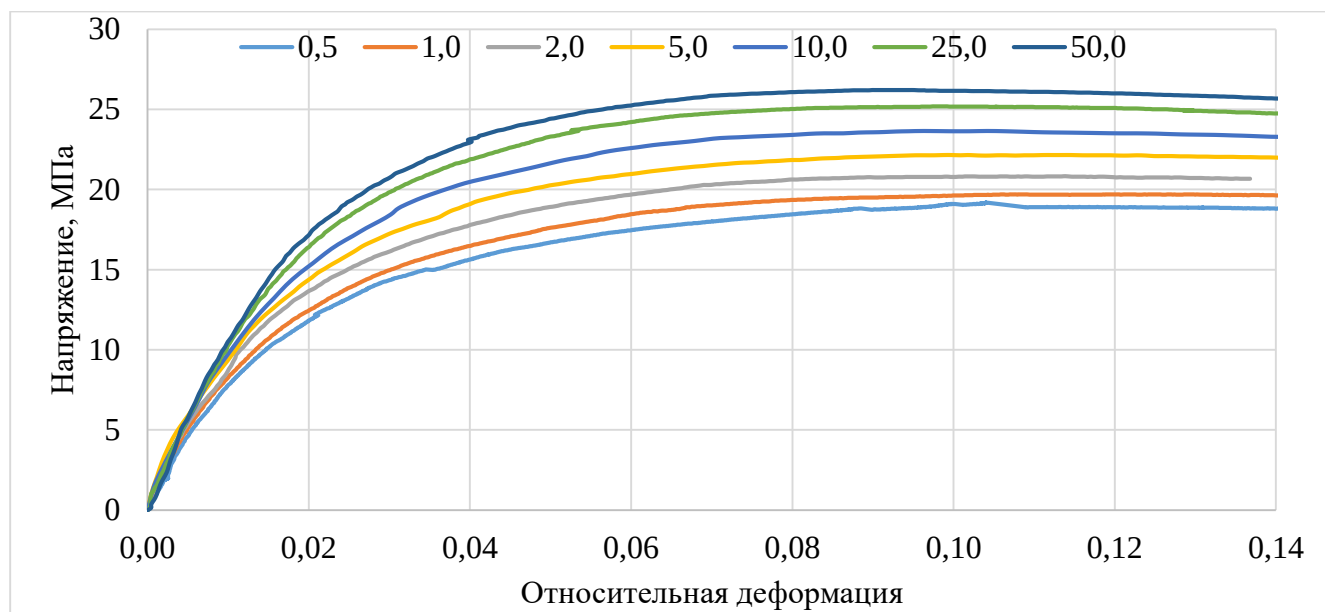


Рисунок 3.8 – Участки типовых диаграммы растяжения для образцов из ПНД на разных скоростях (мм/мин) до относительной деформации, соответствующей 14%

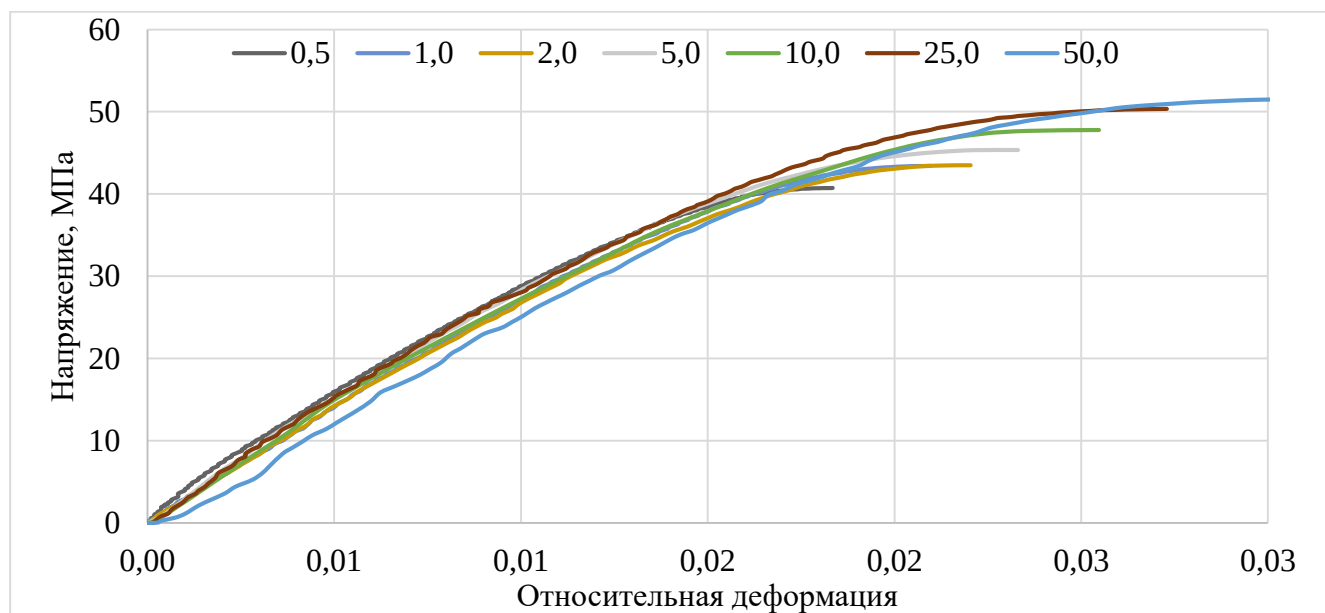


Рисунок 3.9 – Участки типовых диаграмм растяжения для образцов из НПВХ ВХЗ

Таблица 3.7 – Результаты испытаний ПНД ЛЛ и НПВХ ВХЗ на растяжение при различных скоростях нагружения

Скорость, мм/мин	НПВХ ВХЗ		ПНД ЛЛ	
	Предел текучести, МПа	Модуль упругости, МПа	Предел текучести, МПа	Модуль упругости, МПа
0,5	40,9	2814	18,8	647
1,0	42,4	2752	19,8	650
2,0	42,8	2749	20,7	717
5,0	45,1	2870	21,9	774
10,0	46,8	2776	23,5	812
25,0	50,1	2929	25,2	937
50,0	51,0	2700	26,2	968

Таблица 3.8 – Отклонения ФМХ, полученных на различных скоростях от «базового» значения, полученного при скорости 1 мм/мин

Скорость, мм/мин	НПВХ ВХЗ		ПНД ЛЛ	
	По пределу текучести, %	По модулю упругости, %	По пределу текучести, %	По модулю упругости, %
0,5	3,54	2,25	5,05	0,46
1,0	-	-	-	-
2,0	0,94	0,11	4,55	10,31
5,0	6,37	4,29	10,61	19,08
10,0	10,38	0,87	18,69	24,92
25,0	18,16	6,43	27,27	44,15
50,0	20,28	1,89	32,32	48,92

Результаты испытаний показывают существенное влияние скорости нагружения для ПНД ЛЛ – ФМХ могут меняться почти на 50%. У НПВХ ВХЗ влияние также присутствует, но не такое существенное. Ввиду того, что данный эффект не учитывается при рассмотрении термопласта как изотропного и линейно-упругого материала, он должен быть учтен в назначении КИП II этапа.

Для ПНД вводится коэффициент учета $K_{\text{Скор1}} = 0,80$, а для НПВХ ВХЗ – $K_{\text{Скор2}} = 0,90$.

3.3.5 Исследование влияния фотодеструкции на ФМХ термопластов

Фотодеструкция – процесс химического разрушения материала под воздействием ультрафиолетового излучения (УФ излучения). Данный процесс характерен для большинства термопластов, находящихся под открытым солнцем в эксплуатационных условиях, поскольку УФ излучение является неотъемлемой частью спектра солнечного излучения.

В связи с этим, одно из обязательных видов испытаний, которому должны быть подвергнуты полимерные материалы, согласно требованиям Правил РМРС и РКО, является

«испытание на УФ старение». Данное испытание предполагает облучение образцов материала УФ излучением определенным образом, после чего данные образцы должны быть испытаны и изучены на предмет изменения ФМХ материала.

Однако, анализ отечественных Правил в части проведения испытаний на УФ старение показал их некорректность, в связи с чем была выполнена проработка новых рекомендаций, регламентирующих проведение испытаний на старение. Результаты работы были представлены в РМРС в формате пояснительной записки (см. приложение Е), согласованы и получили одобрение на последующую проработку и внедрение в Правила.

В результате выполненной работы, исходные требования Правил РМРС, звучащие следующим образом:

«...Проба, размеры которой определяются, исходя из требуемого числа и размеров образцов, выдерживается в течение 30 сут. в полупогружном состоянии в искусственной морской воде температурой 23 ± 2 °С. В процессе выдержки проба должна ежедневно в течение 2 ч подвергаться облучению ультрафиолетовыми лучами с помощью лампы мощностью 500 Вт, находящейся на расстоянии 50 см от пробы. После выдержки из пробы изготавливаются образцы для проведения необходимых испытаний...»,

переработаны и изложены в актуальных Правилах [52] с начала 2026 г в новом формате:

«...Проба, размеры которой определяются, исходя из требуемого числа и размеров образцов, выдерживается в течение 30 сут. в полупогружном состоянии в искусственной морской воде температурой 23 ± 2 °С. в процессе выдержки, находясь на расстоянии 50 см от ультрафиолетовой лампы, проба должна ежедневно в течение 2 ч подвергаться облучению ультрафиолетовыми лучами длиной волны 200 — 400 нм с плотностью энергии излучения на поверхности пробы 70 — 100 Вт/м². Для создания указанной плотности энергии рекомендуемая мощность ультрафиолетового излучения лампы составляет 210 — 350 Вт. После выдержки из пробы изготавливаются образцы для проведения необходимых испытаний...».

По результатам актуализации Правил РМРС, в части проведения испытаний на УФ старение, была инициирована научно-исследовательская работа (НИР) в части исследования изменения ФМХ термопластов вследствие УФ облучения.

Для выполнения работы, была разработана и построена испытательная камера для УФ облучения. Трехмерная модель камеры представлена на рисунке 3.10, построенная камера – на рисунке 3.11.

Внутри камеры располагаются 4 источника УФ излучения с необходимой длиной волны и требуемой мощностью. Также в камере предусмотрена проточная система охлаждения, система отражения и фильтрации излучения.

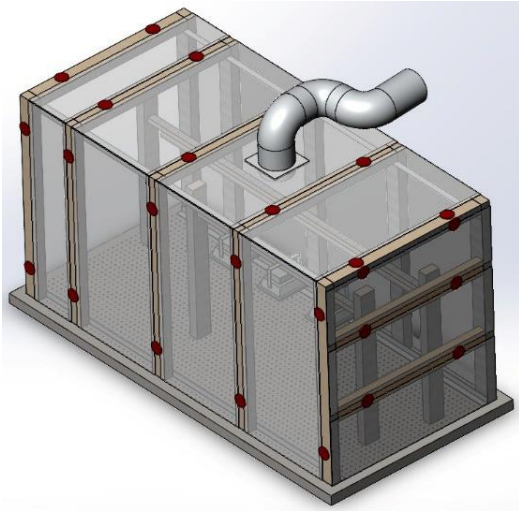


Рисунок 3.10 – Модель испытательной камеры

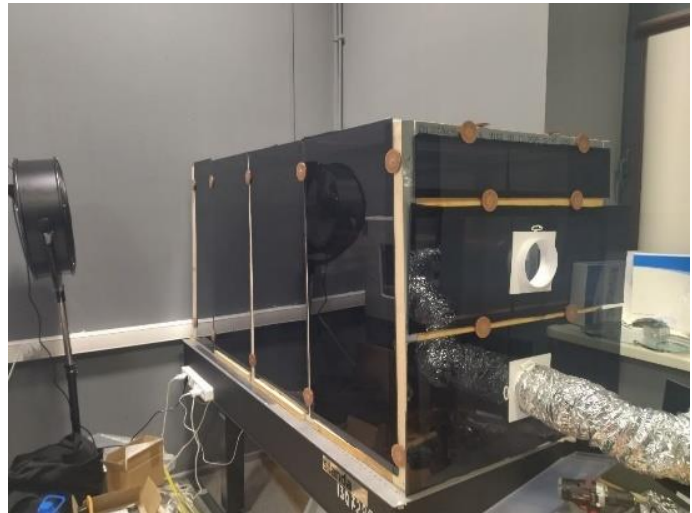


Рисунок 3.11 – Испытательная камера

Научно-исследовательская работа направлена на изучение изменений ФМХ материалов при варьировании температуры выдержки образцов, среды облучения, варьировании плотности мощности излучения и длины волны источника УФ излучения. По результатам данной работы планируется очередная актуализация требований Правил РМРС в части уточнения требования испытаний на УФ старение.

К настоящему моменту выполнено исследование изменения ФМХ термопластов при облучении плотностью мощности 45 Вт/м^2 и длиной волны 365 нм при различных температурах выдержки и средах облучения. Полный цикл исследований (с другими значениями плотности мощности и длин волн, с разным временем облучения, температурой и средой) планируется к завершению в 2027 г.

Для оценки влияния УФ излучения на ФМХ термопластов, из ПНД ЛЛ и НПВХ ВХЗ были изготовлены образцы для проведения испытаний на растяжение, изгиб и на ползучесть при изгибе. Испытания на растяжение и изгиб – стандартные, согласно ГОСТ 11262-2017 [75] и ГОСТ 4648-2014 [76]. Испытание проводилось на поверенной испытательной машине РЭМ-10-А-1-2. Образец на растяжение во время испытания представлен на рисунке 3.12, образец на изгиб – на рисунке 3.13.

Температура проведения испытаний – $25,8^\circ\text{C}$, влажность – 48%. Скорость нагружения: 2 мм/мин.

Испытания на ползучесть при изгибе выполнены при трехточечной схеме нагружения – образец устанавливался на две опоры (расстояние между опорами 200 мм), по центру пролета прикладывалась сосредоточенная нагрузка. Прогиб замерялся в сечении приложения усилия. Температура проведения испытаний – $25,4^\circ\text{C}$, влажность – 50%.

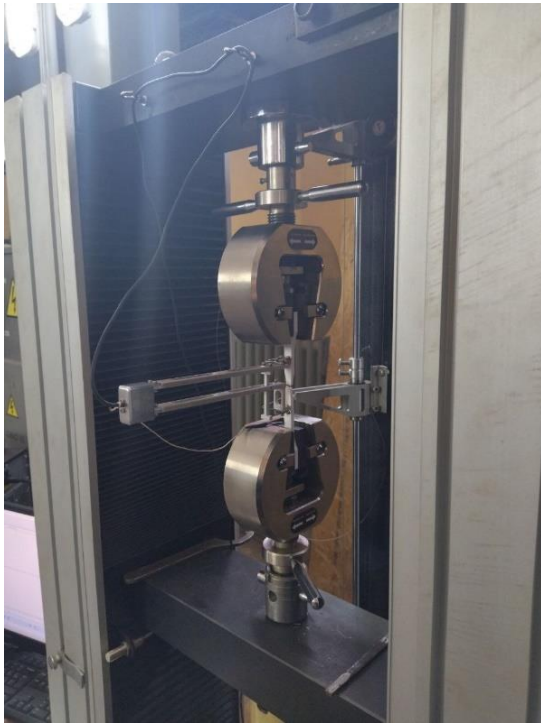


Рисунок 3.12 – Проведение испытания на растяжение с помощью экстензометра



Рисунок 3.13 – Проведение испытаний на изгиб

Усилие прикладывалось за счет подвеса с установленными грузами. Значение прогиба фиксировалось с помощью контактного экстензометра. Показания экстензометра считывались с помощью измерительно-вычислительного комплекса «МІС-026». Время выдержки образца под нагрузкой – 60 мин. Проведение испытаний на ползучесть при изгибе представлено на рисунке 3.14.

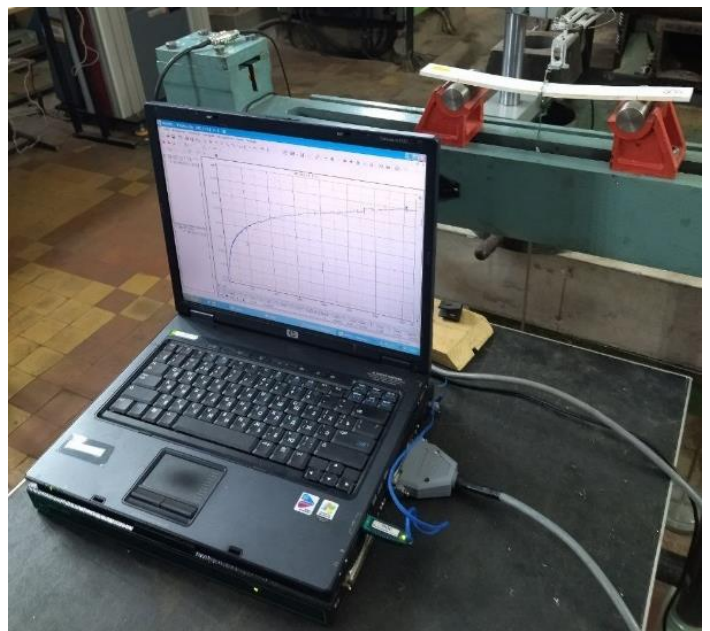


Рисунок 3.14 – Проведение испытания на ползучесть при изгибе

Значение прикладываемого усилия в каждом случае определялось отдельно, в зависимости от размеров поперечного сечения, в котором прикладывалась нагрузка.

В таблице 3.9 представлены результаты испытаний образцов на растяжение. В таблице 3.10 представлены результаты испытаний образцов на изгиб, в таблице 3.11 – на ползучесть при изгибе.

Таблица 3.9 – Результаты испытаний облученных образцов на растяжение

Материал	Среда облучения	Температура выдержки образцов, °С	Предел текучести, МПа	Отклонение от контроля, %	Модуль упругости, МПа	Отклонение от контроля, %
НПВХ ВХЗ	Вода	2	52,5	8,37	2988	9,15
	Воздух	2	52,7	7,86	3271	0,55
	Вода	15	52,4	8,42	2993	9,00
	Воздух	15	52,3	8,56	3105	5,59
	Контроль (без облучения)		57,2	-	3289	-
ПНД ЛЛ	Вода	2	20,8	0,58	647	9,76
	Воздух	2	20,7	0,10	701	2,23
	Вода	15	21,2	2,27	707	1,39
	Воздух	15	20,8	0,58	680	5,16
	Контроль (без облучения)		20,7	-	717	-

Таблица 3.10 – Результаты испытаний облученных образцов на изгиб

Материал	Среда облучения	Температура выдержки образцов, °С	Предел прочности, МПа	Отклонение от контроля, %	Модуль упругости, МПа	Отклонение от контроля, %
НПВХ ВХЗ	Вода	2	88,1	8,13	2832	13,5
	Воздух	2	86,8	9,49	2888	11,8
	Воздух	15	93,7	2,29	3085	5,74
	Контроль (без облучения)		95,9	-	3273	-
ПНД ЛЛ	Вода	2	29,7	4,81	675	1,17
	Воздух	2	27,8	10,9	637	6,73
	Воздух	15	29,0	7,05	652	4,54
	Контроль (без облучения)		31,2	-	683	-

Таблица 3.11 – Результаты испытаний облученных образцов на ползучесть при изгибе

Материал	Среда облучения	Температура выдержки образцов, °С	Прикладываемое усилие, кг	Прогиб, спустя 60 мин, мм ¹	Отклонение от контроля, %
НПВХ ВХЗ	Вода	2	6,17	0,294	2,44
	Воздух	2	6,23	0,315	9,76
	Вода	15	6,99	0,286	0,35
	Воздух	15	6,67	0,327	13,9
	-	-	6,06	0,287	-
ПНД ЛЛ	Вода	2	1,95	5,254	38,7
	Воздух	2	1,84	5,767	52,3
	Вода	15	1,85	4,649	22,8
	Воздух	15	1,80	4,257	12,4
	-	-	1,80	3,787	-

Примечание:

1 – рассматривается прогиб только от ползучести материала, без учета упругой деформации.

Принято, что в расчетном сечении образца из НПВХ ВХЗ нормальное напряжение при изгибе должно составлять 18 МПа, для ПНД ЛЛ – 5 МПа.

Практически при всех испытаниях демонстрируется снижение ФМХ термопластов как по прочностным, так и по жесткостным показателям. У НПВХ ВХЗ, при исследованных параметрах и режимах облучения, наблюдалось снижение ФМХ до 14%. У ПНД ЛЛ при кратковременных испытаниях (на растяжение и изгиб) снижение ФМХ достигало 11%, но при долговременных испытаниях (на ползучесть при изгибе) влияние УФ излучение оказалось существенным, со снижением характеристик до 40%.

При этом, как было отмечено выше, представленные результаты исследований являются лишь начальным этапом в проведении НИР. Предполагается, что при увеличении плотности мощности и времени выдержки, влияние УФ излучения на ФМХ материалов окажется более существенным.

Для учета снижения ФМХ материалов вследствие УФ излучения при проектировании СКК, для ПНД предлагается ввести коэффициент учета $K_{уф1} = 0,80$, а для НПВХ ВХЗ – $K_{уф2} = 0,90$.

3.3.6 Исследование влияния температуры на ФМХ термопластов

Данный вопрос рассмотрен неоднократно в большом количестве различных работ – как для ПНД [43, 44], так и для НПВХ [84, 85]. В связи с этим, необходимо определить количественный критерий учета данного влияния.

Для рассматриваемых термопластов был выполнен цикл испытания на растяжение по ГОСТ 11262-2017 [75] при различных температурах. Температуры варьировались в диапазоне 20 – 60°C. На каждой температуре было исследовано по 5 образцов каждого материала. Скорость нагружения – 5 мм/мин, средняя влажность в помещении – 30%. Испытания проведены на испытательной машине РЭМ-10-А-1-2. Результаты испытаний представлены в таблице 3.12.

Результаты испытаний, однозначно свидетельствуют о существенном влиянию температуры на ФМХ ПНД. При этом можно заметить, что жесткостные параметры изменяются существенно, чем прочностные.

ФМХ НПВХ ВХЗ на растяжение меняются менее существенно, чем у ПНД, однако, на данном этапе можно обратить внимание на существенную разницу в результатах экспериментальных данных:

1. таблица 3.7.: предел текучести – 42,8 МПа, модуль упругости – 2749 МПа;
2. таблица 3.4.: предел текучести – 57,2 МПа, модуль упругости – 3289 МПа;

3. таблица 2.4.: предел текучести – 51,0 МПа, модуль упругости – 3204 МПа (при скорости нагружения 5 мм/мин).

Таблица 3.12 – Результаты испытаний на растяжение при различных температурах

Температура, °С	Предел текучести, МПа	Отклонение от контроля, %	Модуль упругости, МПа	Отклонение от контроля, %
ПНД ЛЛ				
22 (контроль)	21,9	-	774	-
40	16,6	24,2	450	41,9
50	14,0	36,1	352	54,5
60	11,3	48,4	271	64,9
НПВХ ВХЗ				
22 (контроль)	42,8	-	2749	-
30	49,2	14,9	2658	-3,31
40	42,0	1,87	2390	13,1
50	35,1	18,0	2103	23,5

При этом, испытания проводились на поверенном оборудовании при неизменной методологии, и для ПНД ЛЛ подобного разброса результатов не наблюдается.

Разница в результатах испытаний НПВХ ВХЗ может быть объяснена тем, что образцы для испытаний изготавливались из листов с различных партий поставок. Более вероятной причиной может являться условие хранения материала и его фотодеструкция. На рисунке 3.15. показана часть листа НПВХ ВХЗ, поставленная со склада поставщика.

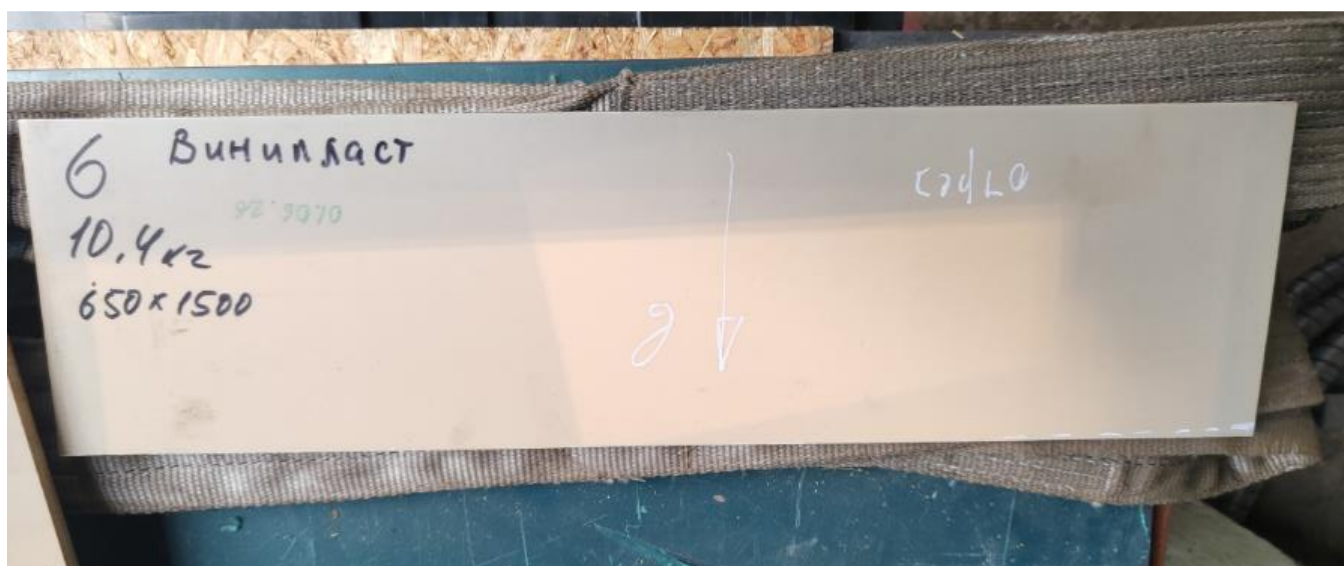


Рисунок 3.15 – Часть листа НПВХ ВХЗ, поставленная со склада поставщика

По рисунку отчетливо прослеживаются разные цвета основного материала. Вероятно, что потемневшая часть – область листа, находившаяся под солнцем, светлая часть – часть листа, на которой лежали другие листы материала.

Данный факт требует проведения дополнительных исследований, в том числе, с анализом микроструктуры материала.

Для учета влияния температуры на снижение ФМХ материалов при проектировании СКК, для ПНД предлагается ввести коэффициент учета $K_{\text{Темп1}} = 0,70$, а для НПВХ ВХЗ – $K_{\text{Темп2}} = 0,80$.

3.3.7 Исследование сварки на ФМХ термопластов

Для создания СКК из термопластов наиболее используемым методом является сварка [14]. На практике, при изготовлении корпусных конструкций, чаще всего на этапе предварительной сборки, используется сварка газовым теплоносителем с присадочным прутом, а на этапе окончательной сборки – экструзионная сварка. В результате выполнения сварочных работ, местная прочность сварного соединения снижается, что обусловлено остаточными напряжениями от температурных воздействий, вероятностью некачественного сварного соединения и другими причинами. В связи с тем, что данный эффект носит неопределенный характер и зависит от разных причин, в том числе и от квалификации и мастерства сварщика, это необходимо учитывать при проектировании и расчетах ККС из термопластов, путем снижения КИП. В данном отношении французское КО в Правилах [32] указывает, что при назначении КИП необходимо учитывать прочность сварных соединений, составляющих 80% от прочности основного материала – т.е. вводить коэффициент учета равный 0,8. Данная величина подтверждается различными источниками [86, 87] – при правильном соблюдении необходимых режимов сварки, прочность итогового соединения может достигать 80-90% от прочности основного материала.

Таким образом, для учета снижения прочности в районах сварки, для НПВХ ВХЗ и для ПНД ЛЛ вводится коэффициент учета $K_{\text{Свар1}} = K_{\text{Свар2}} = 0,80$.

3.4 Определение допускаемых напряжений и перемещений

С учетом полученных данных, имеется возможность определить КИП II и III этапов для ПНД ЛЛ и НПВХ ВХЗ.

Как было отмечено ранее, представленный перечень испытаний не охватывает всех особенностей поведения термопластов, в связи с чем, в расчеты введен дополнительный

коэффициент учета $K_{нф1} = K_{нф2} = 0,90$, необходимый для учета прочих особенностей материала.

Определение КИП для ПНД ЛЛ представлено в таблице 3.13, для НПВХ ВХЗ – в таблице 3.14.

Таблица 3.13 – Определение КИП для ПНД ЛЛ

Свойства материала	КИП II этапа	КИП III этапа
Изотропия	1,00	1,00
Физическая нелинейность	1,00	1,00
Вязкоупругость (ползучесть и релаксация)	0,70	1,00
Влияние скорости нагружения на ФМХ	0,80	1,00
Влияние фотодеструкции на ФМХ	0,80	0,80
Влияние температуры на ФМХ	0,70	1,00
Влияние сварки на ФМХ	0,80	0,80
Неучтенные факторы	0,90	0,90
ИТОГО	0,23	0,57

Таблица 3.14 – Определение КИП для НПВХ ВХЗ

Свойства материала	КИП II этапа	КИП III этапа
Изотропия	0,90	0,90
Физическая нелинейность	1,00	1,00
Вязкоупругость (ползучесть и релаксация)	0,95	1,00
Влияние скорости нагружения на ФМХ	0,90	1,00
Влияние фотодеструкции на ФМХ	0,90	0,90
Влияние температуры на ФМХ	0,90	1,00
Влияние сварки на ФМХ	0,80	0,80
Неучтенные факторы	0,90	0,90
ИТОГО	0,45	0,58

Полученные результаты для ПНД ЛЛ существенно отличаются от практики зарубежных КО, где КИП варьируются в диапазоне от 0,45 до 0,69 при применении к ПНД модели изотропного и линейно-упругого материала.

Данный вопрос ранее также был освещен в работе [10], где авторами взамен КИП Франции и Италии предлагается воспользоваться австралийским опытом, согласно которому КИП определяется по формуле (3.1):

$$\sigma_{\text{доп}} = 0,33 \cdot R_{eH} \cdot c, \quad (3.1)$$

где R_{eH} – предел текучести ПНД на растяжение;

c – коэффициент, принимаемый равным 1,0 для статических нагрузок и 1,8 для динамических нагрузок.

Для выбора размеров связей ККС из ПНД, на этапе предварительного проектирования, предлагается пользоваться КИП II этапа, представленными в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – КИП II этапа для ПНД

Тип связи	Допускаемое напряжение
Пластины	$\sigma = 0,23 \cdot R_{eH}$
Балки набора	$\sigma = 0,23 \cdot R_{eH}$
	$\tau = 0,14 \cdot R_{eH}$

При использовании ПО, выполняющего расчеты МКЭ, прочность балок и пластин предлагается оценивать по эквивалентным напряжениям по Мизесу, с учетом того, что КИП II этапа равен 0,23.

На этапе выполнения проверочных расчетов прочности с помощью ПО, выполняющего расчеты МКЭ с помощью СКММ, достаточную прочность конструкций предлагается оценивать по эквивалентным напряжениям по Мизесу, с учетом того, что КИП III этапа равен 0,57.

КИП для НПВХ ВХЗ, определенные в таблице 3.14, на II и III этапах сопоставимы, из чего можно сделать вывод, что использование III этапа проектирования (согласно рисунку 2.1) для данного материала не является необходимым – проектирование конструкции корпуса судна можно выполнить из условия рассмотрения материала как изотропного и линейно-упругого. При проектировании, предлагается пользоваться коэффициентами использования прочности, представленными в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – КИП для НПВХ

Тип связи	Допускаемое напряжение
Пластины	$\sigma = 0,45 \cdot R_{eH}$
Балки набора	$\sigma = 0,45 \cdot R_{eH}$
	$\tau = 0,26 \cdot R_{eH}$

При использовании ПО выполняющего расчеты МКЭ, достаточную прочность конструкций предлагается оценивать по эквивалентным напряжениям по Мизесу, с учетом того, что допускаемое напряжение составляет 0,45 от предела текучести НПВХ на растяжение.

Для определения допускаемых деформаций на этапе предварительного выбора размеров связей, предлагается воспользоваться итальянским опытом с учетом некоторых изменений:

1. прогиб пластины при расчетном давлении не должен превышать 2,5% от шпации;
2. максимальный прогиб корпуса суда не должен превышать 1/200 длины судна в сечении любого шпангоута.

Значение допускаемого прогиба всего корпуса преднамеренно занижено, с целью косвенного учета деформаций от ползучести, не учитываемых в расчете непосредственным образом.

На этапе выполнения проверочных расчетов прочности, критерий допускаемых напряжений не является определяющим, поскольку термопластам свойственно явление релаксации, при котором реальные напряжения в конструкции со временем снижаются, в то время как деформации постоянно увеличиваются, вследствие ползучести. Таким образом, критерий жесткости является первостепенным.

В то же время, определение допускаемых деформаций в виде конкретного значения допускаемого прогиба нецелесообразно ввиду того, что перемещения при ползучести постоянно растут, следовательно, значение допускаемого прогиба со временем, так или иначе, будет достигнуто. С учетом этого, на этапе выполнения проверочных расчетов прочности, предлагается нормировать не определенное значение прогиба, а скорость ползучести.

Типовая кривая ползучести представлена на рисунке 3.16.

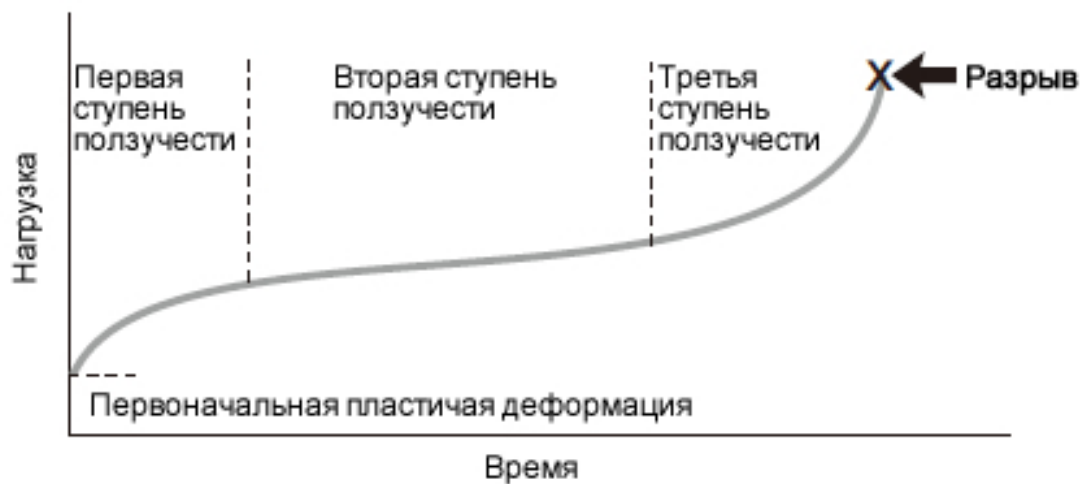


Рисунок 3.16 – Пример типовой кривой ползучести

Данная кривая состоит из 3 ключевых ступеней:

- первая ступень ползучести – участок неустановившейся ползучести, характеризующийся увеличением скорости ползучести;
- вторая ступень ползучести – участок установившейся ползучести, характеризующийся или постоянной или медленно изменяющейся скоростью;
- третья ступень ползучести – участок ускоренной ползучести, характеризующийся увеличением скорости ползучести и последующим разрушением образца.

Первая и вторая ступень ползучести носят относительно безопасный характер и не приводят к разрушению образца. При этом протяженность второй ступени ползучести, зачастую, существенно больше, чем первой, вследствие чего, именно вторая ступень характеризует ресурс работы конструкции.

Согласно работам [88-90] при уровнях напряжений, составляющих 40-60% от предела текучести на растяжение, ПНД не склонен к проявлению третьей ступени ползучести.

С учетом влияния эксплуатационных факторов (УФ, температура, скорость нагружения, переменные нагрузки и пр.) данную границу принято снизить до 20-40%, что для рассматриваемого в работе ПНД ЛЛ, при номинальном значении, равном 19,8 МПа (таблица 3.7, при скорости 1,0 мм/мин), составляет 3,96 МПа – 7,92 МПа.

В качестве контрольного значения принято напряжение 7,50 МПа и соответствующая кривая ползучести, представленная на рисунке 3.7. Граница между первой и второй ступенью ползучести носит условный характер, и для рассматриваемой кривой принята равной на отметке 1500 с. Начиная с данного момента времени скорость ползучести изменяется незначительно. Средняя скорость ползучести – 0,0000965 мм/сек или 0,347 мм/час.

Таким образом, для полиэтилена низкого давления в качестве критерия допускаемых деформаций на этапе выполнения проверочных расчетов прочности принимается критическая скорость ползучести, равная 0,00009 мм/сек или 0,324 мм/час.

Оценка достаточности выбранных допускаемых напряжений и перемещений может быть проверена только опытом эксплуатации судов с регулярным проведением анализа технического состояния корпуса судна. В настоящий момент выполнить данную оценку не представляется возможным ввиду того, что у автора отсутствует доступ к полиэтиленовым судам, находящимся в эксплуатации, а суда из НПВХ не проектируются и не строятся вовсе. В связи с чем, вопрос оптимизации предлагаемых критериев прочности и жесткости остается открытым.

При проектировании СКК, помимо критериев прочности и жесткости, также необходимо учитывать и критерии устойчивости. Однако, данный вопрос является отдельным предметом исследования и не рассматривается в данной работе.

3.5 Определение трехсетевой модели материала

Для выполнения проверочных расчетов прочности СКК из ПНД ЛЛ необходимо определить коэффициенты трехсетевой модели материала, представленные в таблице 2.11. При этом, уравнения, полученные на основе данных коэффициентов, должны в должной мере описывать поведение материала при различных видах нагружения, скоростях, температурных условиях и пр. Для корректного подбора численных значений коэффициентов, использовалось программное обеспечение «MCalibration» – специализированное ПО, предназначенное для подбора коэффициентов определяющих соотношений различных моделей материалов на основе экспериментальных данных. Для этого, в ПО были интегрированы:

1. кривые релаксации, представленные на рисунке 3.5;

2. кривые ползучести, представленные на рисунке 3.7;
3. диаграммы растяжения при различных скоростях нагружения, представленные на рисунке 3.8 за исключением диаграммы, полученной при скорости нагружения 5,0 мм/мин;
4. отдельная диаграмма растяжения при скорости 5,0 мм/мин, полученная в результате испытания на растяжение с разгрузкой. Данное решение было обусловлено попыткой учета петли гистерезиса, получаемой при разгрузке образца во время испытания;
5. значение коэффициента Пуассона для ПНД ЛЛ – 0,43. Определение коэффициента выполнено аналогичным образом, как было описано в п. п. 2.3;
6. кривые сжатия при скорости нагружения 10,0 мм/мин;
7. диаграммы растяжения, при температурах 40°C и 50°C, полученные в рамках исследований, описанных в пп. 3.1.6. Дополнительно, учтена диаграмма растяжения, полученная при температуре 26,6 °C.

Все экспериментальные результаты, интегрированные в программное обеспечение, указаны при фактических температурах испытаний. Таким образом, влияние температуры на ФМХ материала учитывается не только посредством диаграмм растяжения, но и всех экспериментальных данных.

Для получения более корректных данных, все диаграммы растяжения ограничены уровнем напряжения 15,0 МПа, поскольку, согласно предлагаемой методике, даже на этапе выполнения проверочных расчетов прочности, напряжения в конструкции не могут превышать 0,57 от предела текучести, что составляет около 12 МПа. Следовательно, участки кривой выше данной отметки напряжений не представляют интереса для выполнения расчетов.

По результатам калибровки экспериментальных данных, выполнен подбор коэффициентов и величин, указанных в таблице 2.11 Результаты калибровки представлены в таблице 3.17.

По окончанию калибровки имеется возможность соотнести экспериментальные кривые с расчетными. Ниже представлена серия рисунков с сопоставлением экспериментальных (обозначение «Эк.») и расчетных (обозначение «Расч.») данных:

1. для диаграммы сжатия – рисунок 3.17;
2. для диаграмм растяжения при различных температурах – рисунок 3.18.
3. для кривых релаксации – рисунок 3.19;
4. для кривых ползучести – рисунок 3.20;
5. для диаграмм растяжения при различных скоростях нагружения – рисунок 3.21;
6. для диаграммы растяжения с разгрузкой (при скорости нагружения 5,0 мм/мин) – рисунок 3.22;

Таблица 3.17 – Коэффициенты трехсетевой модели ПНД ЛЛ

№ п/п	Обозначение	Размерность	Описание	Значение
1	μ_A	МПа	Модуль сдвига сети А	$257257 \cdot 10^{-3}$
2	$\widehat{\tau}_A$	МПа	Напряжение текучести сети А	$756323 \cdot 10^{-7}$
3	m_A	-	Коэффициент, отражающий чувствительность скорость течения от напряжения в сети А	$219627 \cdot 10^{-5}$
4	μ_{Bi}	МПа	Начальный модуль сдвига сети В	$111456 \cdot 10^{-3}$
5	μ_{Bf}	МПа	Конечный модуль сдвига сети В	$619088 \cdot 10^{-5}$
6	β	-	Коэффициент скорости изменения модуля сдвига сети В	$178452 \cdot 10^{-5}$
7	$\widehat{\tau}_B$	МПа	Напряжение текучести сети В	$311186 \cdot 10^{-5}$
8	m_B	-	Коэффициент, отражающий чувствительность скорость течения от напряжения в сети В	$801484 \cdot 10^{-5}$
9	μ_C	МПа	Модуль сдвига сети С	$35879 \cdot 10^{-3}$
10	q	-	Относительный вклад I_2 в сеть С	$774938 \cdot 10^{-6}$
11	a	-	Коэффициент, отражающие влияние среднего нормального напряжения на состояние текучести сети	$331318 \cdot 10^{-9}$
12	n	-	Коэффициент, отражающий влияние температуры на скорость течения	$675263 \cdot 10^{-4}$
13	λ_L	-	Предельное удлинение молекулярной цепи	$110994 \cdot 10^{-4}$
14	k	МПа	Модуль объемной упругости	1069,24
15	$\hat{\theta}$	К	Температурный коэффициент, характеризующий скорость изменения модуля сдвига	17725,6
16	θ_0	К	Базовая температура, соответствующая модулю сдвига	$379362 \cdot 10^{-3}$

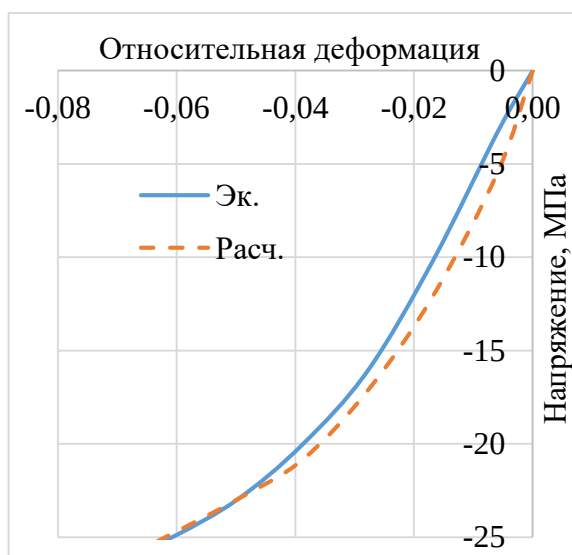


Рисунок 3.17 – Сравнение экспериментальной и расчетной диаграммы сжатия при скорости испытаний 10 мм/мин

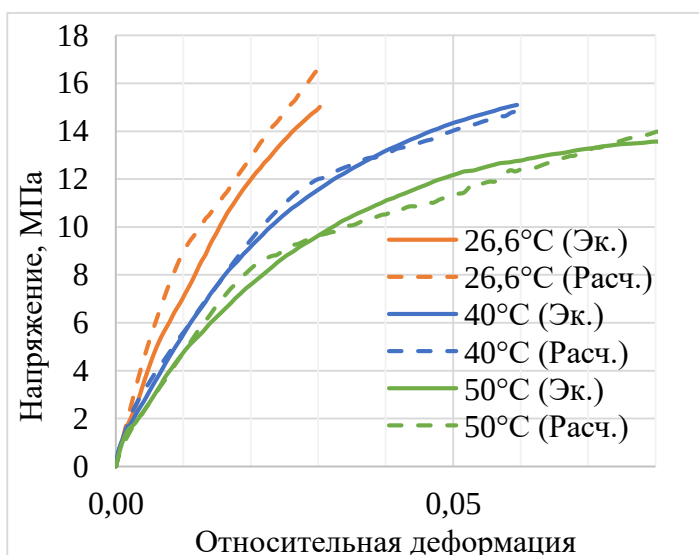


Рисунок 3.18 – Сравнение экспериментальных и расчетных диаграмм растяжения, полученных при разных температурах испытаний при скорости нагружения 5 мм/мин

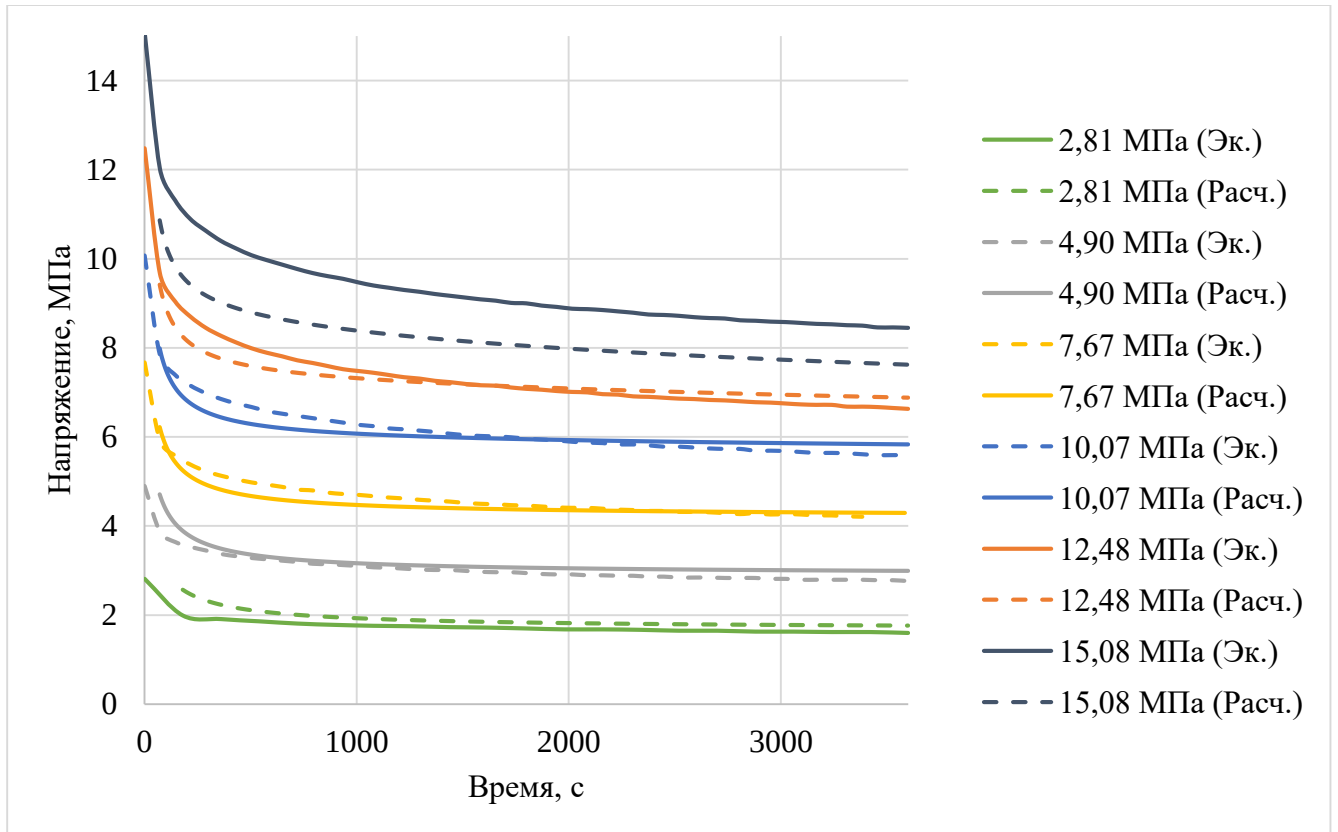


Рисунок 3.19 – Сравнение экспериментальных и расчетных кривых релаксации

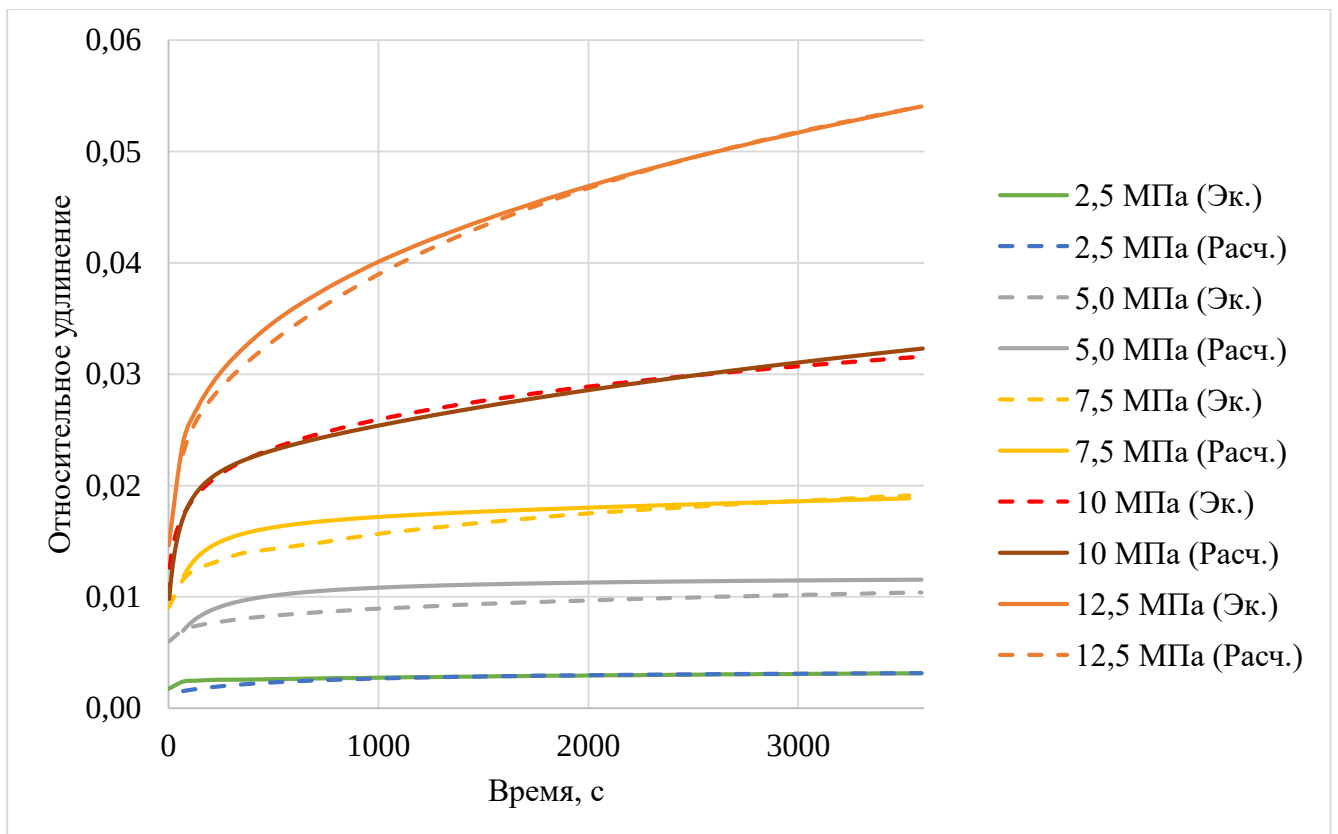


Рисунок 3.20 – Сравнение экспериментальных и расчетных кривых ползучести

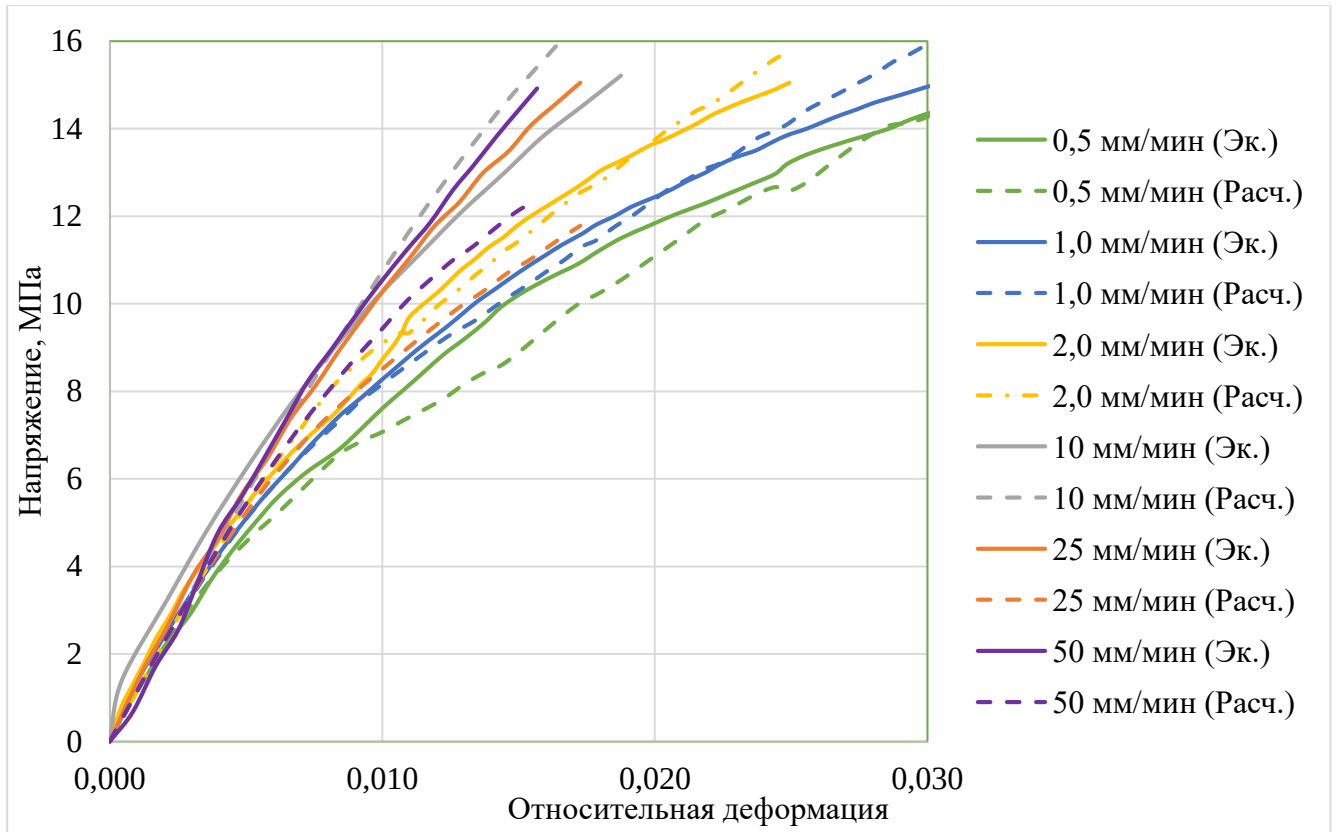


Рисунок 3.21 – Сравнение экспериментальных и расчетных диаграмм растяжения, полученных при разных скоростях нагружения

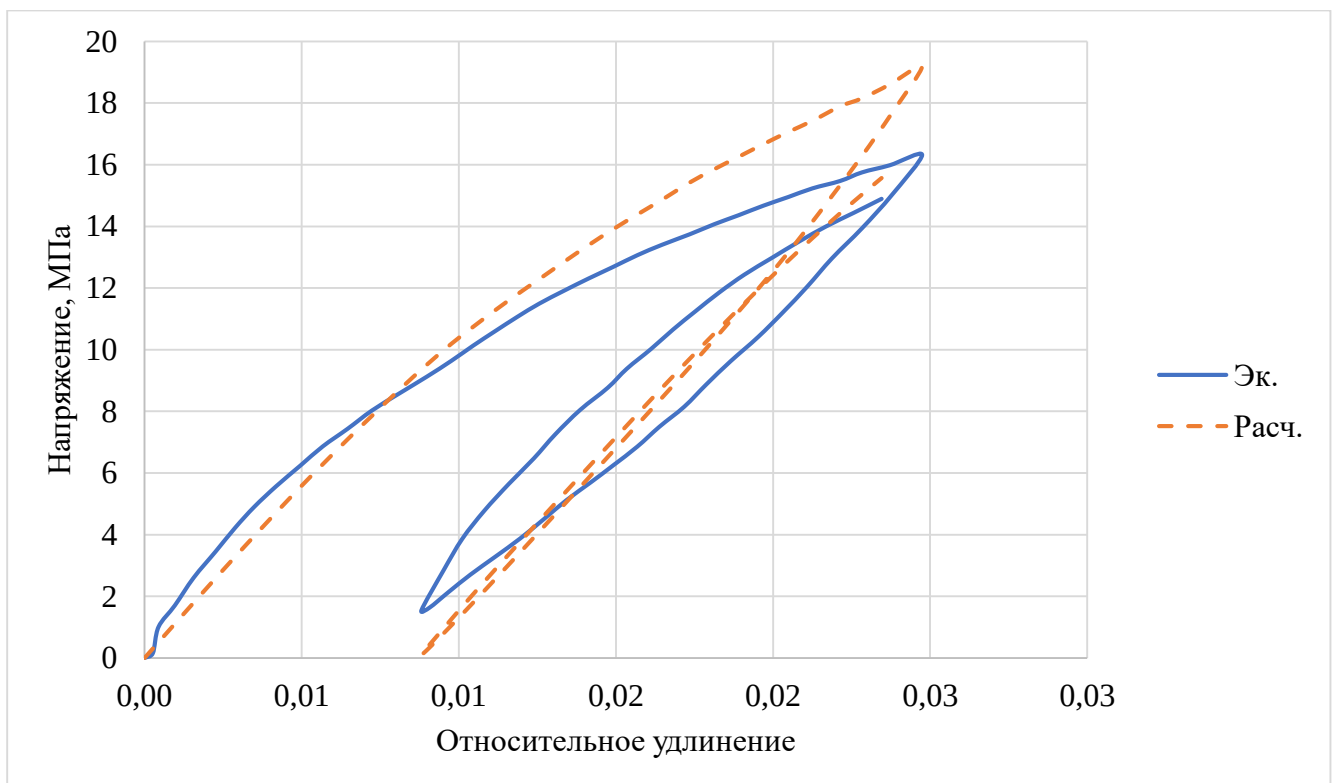


Рисунок 3.22 – Сравнение экспериментальных и расчетных диаграмм растяжения с разгрузкой при скорости испытаний 5 мм/мин

Сопоставляя расчетные и экспериментальные кривые, можно сформулировать следующие выводы:

1. трехсетевая модель позволяет учесть все рассмотренные особенности материала – вязкоупругость, скорость и температуру нагружения;
2. все кривые релаксации, за исключением кривой, соответствующей уровню 15,08 МПа, хорошо описываются расчетными кривыми. В то же время стоит отметить, что напряжение 15,08 МПа составляет около 65% от предела текучести материала на растяжение, что превышает КИП III этапа, равный 0,57. В связи с этим, данная кривая не имеет определяющего значения;
3. расчетные кривые ползучести достаточно точно описывают экспериментальные кривые на первой и второй ступени ползучести;
4. экспериментальные диаграммы растяжения при различных скоростях нагружения соотносятся с расчетными только в рамках отдельных скоростей – на скоростях нагружения 1,0 мм/мин, 2,0 мм/мин и 10,0 мм/мин совпадение удовлетворительное. На скоростях 0,5 мм/мин, 20 мм/мин и 25 мм/мин расхождение больше, но не превышает, в среднем, 2 МПа в расчетном диапазоне напряжений;
5. ТММ в рамках полученных значений, представленных в таблице 3.17, практически не учитывает явление гистерезиса, свойственное для многих полимерных материалов. Это обусловлено недостаточным количеством исходных данных для более корректной калибровки (циклических испытаний при различных скоростях нагружения);
6. расчетная диаграмма сжатия, практически во всем расчетном диапазоне напряжений, отличается от экспериментальной также, на 2 МПа.
7. экспериментальные диаграммы растяжения при температурах 40°C и 50°C удовлетворительно соотносятся с расчетными, однако имеется некоторое расхождение для диаграммы растяжения, полученной при температуре 26,6°C. При этом, экспериментальная диаграмма растяжения, представленная на рисунке 3.22 при той же скорости нагружения, но при температуре 21,3°C демонстрирует удовлетворительное соответствие расчетной кривой. В дальнейших работах планируется уточнить поведение расчетной модели материала в интервале температур 25-40°C.

3.6 Вывод по главе 3

Для подбора корректных КИП, выполнено исследование различных свойств термопластов (вязкоупругость, изотропность, фотодеструкция и пр.) и определены те особенности, которые имеют определяющее значение для назначения допускаемых напряжений. С учетом проведенных исследований, а также зарубежного опыта, сформированы критерии прочности и

жесткости, необходимые для проектирования ККС как на этапе предварительного выбора размеров связей, так и на этапе выполнения проверочных расчетов прочности с применением СКММ.

Результаты выполненных исследований позволили осуществить подбор коэффициентов трехсетевой модели материала ПНД ЛЛ. По результатам калибровки, СКММ позволяет учитывать разную работу материала при различных скоростях и температурах нагружения, а также вязкоупругие свойства. В то же время, требуется проведение дополнительных исследований для уточнения значений коэффициентов определяющих уравнений, с целью более корректного учета гистерезиса, а также поведения материала при отдельных температурах и скоростях нагружения.

Проведенные исследования показали, что применение СКММ не требуется для всех термопластов – к примеру, для НПВХ свойственная слабая вязкоупругость, несущественное влияние скорости нагружения на ФМХ материала, отсутствие нелинейности на начальном участке диаграммы и пр. В связи с этим, введение III этапа (согласно рисунку 2.1) не требуется – целесообразно ограничиться моделью изотропного и линейно-упругого материала, но с заниженными КИП.

На данном этапе все составляющие элементы предлагаемого алгоритма проектирования определены. Требуется его апробирование на рассматриваемом объекте проектирования.

Таким образом, цель 4 главы диссертации – апробация методики проектирования на рассматриваемой конструкции плавучего причала.

4 ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Применение предлагаемой методики продемонстрировано на примере проектирования конструкции корпуса плавучего причала, описанного в п. 1.3.

4.1 Описание расчетного случая

В качестве расчетного, принят случай, при котором на палубу причала действуют следующие нагрузки:

- палуба блока №1 – район 0-8 шп – 2 кПа;
- палуба блока №2 – район 8-16 шп – 6 кПа;
- палуба блока №3 – район 16-24 шп – 6 кПа;
- палуба блока №4 – район 24-32 шп – 2 кПа.

Распределение нагрузок на палубу представлено на рисунке 4.1.

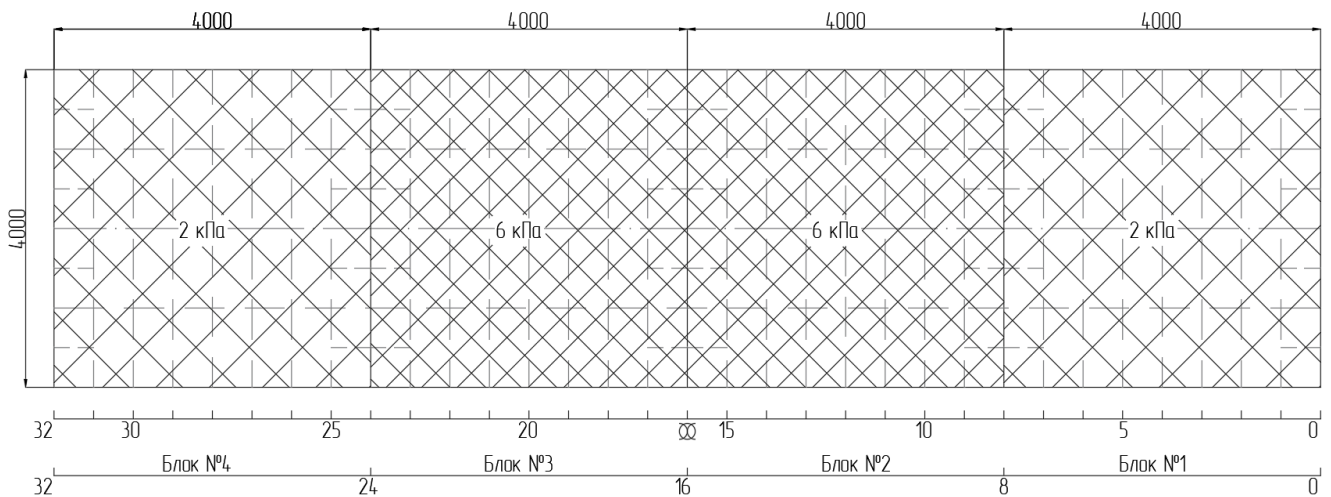


Рисунок 4.1 – Распределение нагрузок на палубу плавучего причала

Данные нагрузки обеспечивают среднюю осадку причала в районе значения осадки по конструктивную ватерлинию, а также общий изгиб причала.

Помимо нагрузок на палубу, в расчете учитывались собственный вес конструкции и равномерно распределенная нагрузка по всей палубе причала от массы уложенного деревянного настила. Нагрузки от массы горловин, кнехтов, спасательных кругов, лееров и т.д. в расчете не учитывались.

Так как все нагрузки симметричны относительно ДП и плоскости мидель-шпангоута, а корпус причала имеет прямостенную прямоугольную форму, причал не имеет крена и дифферента, и сидит по среднюю осадку на ровный киль.

Помимо сил веса, в расчете учитывались нагрузки от гидростатического давления, действующего на наружную обшивку конструкции причала. Учет волновых нагрузок не выполнялся.

4.2 Выбор материала конструкции корпуса причала (I этап)

В качестве ОКМ плавучего причала рассмотрено 2 материала

1. ПНД от компании ООО «Лада-Лист» – ПНД ЛЛ;
2. НПВХ от компании АО «Владимирский Химический Завод» – НПВХ ВХЗ;

Данные материалы должны соответствовать требованиям Правил РМРС к минимальным физико-механическим характеристикам термопластов.

Поскольку НПВХ в настоящий момент не используется в отрасли, и в рамках данной работы рассматривается, как будущая возможная альтернатива ПНД, требования к минимальным ФМХ материала еще не разработаны.

Несмотря на лучшие ФМХ НПВХ, чем у ПНД, он содержит в своем составе молекулы хлора, что может ограничить его использование в судостроении в качестве ОКМ из-за требований к пожаробезопасности и экологичности. Данный вопрос требует отдельного изучения и согласования с КО.

С целью оценки целесообразности применения НПВХ в качестве ОКМ, по сравнению с ПНД, предполагается, что ФМХ НПВХ ВХЗ удовлетворяют требованиям КО к ОКМ.

Требования к минимальным ФМХ ПНД представлены в таблице 2.5. Некоторые из фактических свойств материала, согласно перечню в таблице 2.5, были определены ранее в рамках 3 главы диссертации.

Значения предела текучести, модуля упругости и удлинения при пределе текучести при растяжении получены из рисунка 3.8 и данных в таблице 3.7. Согласно [75], определение модуля упругости должно выполняться при скорости нагружения 1,0 мм/мин. В связи с этим, все необходимые характеристики на растяжение приняты при скорости 1,0 мм/мин.

Испытания на определение плотности и ФМХ на изгиб выполнены отдельно.

Сравнение фактических характеристик с пороговыми значениями представлено в таблице 4.1. Из представленных в таблице данных следует, что ПНД ЛЛ не соответствует требованиям РМРС, следовательно, не может быть применен в качестве ОКМ для изготовления конструкции плавучего причала. В то же время, сравнивая пороговые значения с ФМХ ПНД ТК, представленные в таблице 2.6, можно заметить, что по большинству критериев материал соответствует требованиям КО, за исключением значения удлинения при пределе текучести при растяжении (пороговое значение – 13%, фактическое – 17,8%). Однако, данный параметр не

является определяющим для проектирования конструкции корпуса и выполнения проверочных расчетов прочности, поэтому материал мог бы быть допущен в качестве ОКМ при соответствующем обосновании.

Несмотря на то, что ПНД ЛЛ не может быть использован, для демонстрации предлагаемой методики проектирования он принят в качестве ОКМ плавучего причала.

Таблица 4.1 – Сравнение пороговых и фактических ФМХ ПНД ЛЛ

Свойство	Ед. изм.	Пороговое значение	Фактическое значение	Соответствие требованиям КО
Плотность	г/см ³	0,946	0,97	+
Предел текучести при растяжении	МПа	22	19,8	-
Удлинение при пределе текучести при растяжении	%	13	10,6	-
Модуль упругости при растяжении	МПа	950	650	-
Модуль сдвига	МПа	300	не определ.	не определ.
Предел текучести при сдвиге	МПа	14	не определ.	не определ.
Коэффициент Пуассона	-	0,45	0,43	+
Водопоглощение	%	0,010 – 0,017	не определ.	не определ.
Предел прочности при изгибе	МПа	40	31,2	-
Модуль упругости при изгибе	МПа	750	683	-
Температура тепловой деформации	°C	70	не определ.	не определ.

4.3 Определение минимальных размеров связей и предварительное проектирование конструкции корпуса (II этап)

Помимо проектирования конструкции корпуса плавучего причала из ПНД ЛЛ и НПВХ ВХЗ по предлагаемой методике, дополнительно выполнено проектирование конструкции из ПНД ЛЛ согласно требованиям и критериям итальянского КО, с целью демонстрации разницы подходов и итогового результата.

Таким образом, выполнен расчет трех конструкций плавучих причалов:

1. из ПНД ЛЛ по предлагаемой методике – конструкция №1;
2. из ПНД ЛЛ по критериям и нормам итальянских Правил – конструкция №2;
3. из НПВХ ВХЗ по предлагаемой методике – конструкция №3.

4.3.1 Определение минимальных размеров связей

При проектировании, согласно предлагаемой методике (для конструкций №1 и №3), размеры связей должны удовлетворять следующим минимальным ограничениям:

- минимальная толщина наружной обшивки из ПНД – 6,0 мм, из НПВХ – 4,0 мм;
- максимальное отношение высоты балки к ее толщине для ПНД и НПВХ – 9,0.

При проектировании конструкции №2, минимальный момент сопротивления балок набора из ПНД ЛЛ не должен быть меньше 15 см³.

4.3.2 Проектирование конструкции №1

Корпус плавучего причала разбит на 4 блока 3 водонепроницаемыми поперечными переборками. В расчете принимается допущение однотипности размеров связей в рамках одного блока.

Принятые размеры элементов конструкции корпуса причала на первой итерации представлены в таблице 4.2. В данной таблице «t, мм» – толщина связи в мм, «b, мм» – высота связи в мм.

Таблица 4.2 – Размеры связей конструкции №1 на итерации №1.1

Перекрытие	Связь	Блок 1		Блок 2		Блок 3		Блок 4	
		t, мм	b, мм	t, мм	b, мм	t, мм	b, мм	t, мм	b, мм
Палуба	Настил	20	-	20	-	20	-	20	-
	Карлингс	24	200	24	200	24	200	24	200
	Бимс	24	200	24	200	24	200	24	200
Днище	Обшивка	20	-	20	-	20	-	20	-
	Шпангоут	24	200	24	200	24	200	24	200
	Стрингер	24	200	24	200	24	200	24	200
Борт	Обшивка	16	-	16	-	16	-	16	-
	Шпангоут	24	180	24	180	24	180	24	180
Переборки	Обшивка	16	-	16	-	16	-	16	-
	Стойка	16	140	16	140	16	140	16	140

В таблице 4.3 представлен расчет весовой нагрузки в рассматриваемом расчетном случае. При водоизмещении 32 379 кг, средняя осадка плавучего причала составила 0,511 м, а максимальное значение гидростатического давления – 5013 Па.

Помимо масс и координат центра тяжести каждой статьи нагрузки, в таблице 4.3 представлен процент массы каждой статьи от общего водоизмещения. Сумма нагрузок от давления на палубу, собственного веса конструкции и массы деревянного настила (всех нагрузок, участвующих непосредственно в расчете) составляет 98,4% от общего водоизмещения причала.

Оценка достаточной прочности конструкции корпуса причала выполнена МКЭ с помощью ПО «Femap with NX Nastran». Рассматриваемые на данном этапе критерии прочности и жесткости представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.3 – Расчет весовой нагрузки

Наименование	Кол-во, шт.	Масса ед., кг	Масса итого, кг	% от водоизм.
Доска 4000х100х20	160	2	320	0,98
Горловина	8	15	120	0,37
Кнехт	6	3,06	18	0,06
Гусек 650х25	8	0,75	6	0,02
Кранцы	12	10	120	0,37
Спасательный круг	5	2	10	0,03
Цепной леер	72	1,3	94	0,29
Леерные стойки и подпорки	50	0,56	28	0,09
Спасательный шнур	40	0,05	2	0,01
Рундук	2	40	80	0,24
Снабжение	1	50	50	0,15
Корпус	1	5785	5785	17,68
Масса на палубу причала в районе 0-8 шп.	1	3262	3262	9,97
Масса на палубу причала в районе 8-16 шп.	1	9786	9786	29,9
Масса на палубу причала в районе 16-24 шп.	1	9786	9786	29,9
Масса на палубу причала в районе 24-32 шп.	1	3262	3262	9,97
Итого			32 729	100

Таблица 4.4 – Критерии прочности и жесткости на этапе предварительного проектирования конструкции №1

Тип связи	Допускаемое напряжение	Допускаемое перемещение
Пластины	$\sigma_{mis} = 0,23R_{ПНД}$	$y_{max} = 0,025s$
Балки набора	$\sigma_{mis} = 0,23R_{ПНД}$	-
Корпус в целом	-	$y_{max} = L/200$

Примечание: s – шпация (0,5 м), L – длина причала (16,0 м), $R_{ПНД}$ – предел текучести ПНД ЛЛ на растяжение (19,8 МПа).

Как было указано выше, в данной работе не рассматривается вопрос критериев потери устойчивости. Тем не менее, при подборе размеров связей учитывалось, что критерий потери устойчивости должен быть больше 1,0.

На данном этапе расчета конструкция корпуса была смоделирована пластинчатыми (для наружной обшивки, палубы и переборок) и балочными (для всего набора) элементами. Выреза и локальные подкрепления отдельных элементов плавучего причала (кнехтов, рундука, леерных стоек и т.д.) не моделировались.

Размер элементов – 30 мм.

Расчетный случай – согласно п. 4.1. Закрепления в расчете отсутствуют, поскольку предполагается, что силы веса (давление на палубу, собственный вес конструкции и масса от

деревянного настила) должны быть полностью скомпенсированы силами поддержания от гидростатического давления. Невязка между двумя группами сил учитывается силами инерции.

Материал корпуса – ПНД ЛЛ со следующими физико-механическими свойствами:

- плотность – 970 кг/м³;
- модуль упругости – 650 МПа;
- коэффициент Пуассона – 0,43.

Тип расчета – линейный статический анализ.

На рисунке 4.2 представлена картина деформированного состояния корпуса причала, на рисунке 4.3. – картина напряжений в пластинчатых элементах, на рисунке 4.4. – в балочных элементах.

В таблице 4.5. представлены значения максимальных напряжений в группах связей поблочно, в таблице 4.6 – проверка соответствия принятых критериев прочности, жесткости и устойчивости результатам расчета.

Таблица 4.5 – Максимальные напряжения в группах связей поблочно на итерации №1.1

Перекрытие	Связь	Максимальное напряжение, МПа			
		Блок №1	Блок №2	Блок №3	Блок №4
Палуба	Настил	1,03	3,47	3,47	1,03
	Карлингс	1,19	1,90	1,90	1,19
	Бимс	2,62	6,07	6,07	2,62
Днище	Обшивка	1,19	1,72	1,72	1,19
	Шпангоут	4,04	4,25	4,25	4,04
	Стрингер	3,70	4,24	4,24	3,70
Борт	Обшивка	1,24	1,75	1,75	1,24
	Шпангоут	2,98	2,52	2,52	2,98
Переборка	Обшивка	2,03	2,96	2,96	2,03
	Стойка	3,12	4,12	4,12	3,12

Таблица 4.6 – Соответствие результатов расчета принятым критериям прочности, жесткости и устойчивости на итерации №1.1

Критерий	Пороговое значение	Фактическое значение
Максимальный прогиб пластины, мм	12,5	4,50
Максимальный прогиб корпуса, мм	80	48,4
Максимальные напряжения, МПа	4,55	6,07
Коэффициент потери устойчивости	1,0	1,82

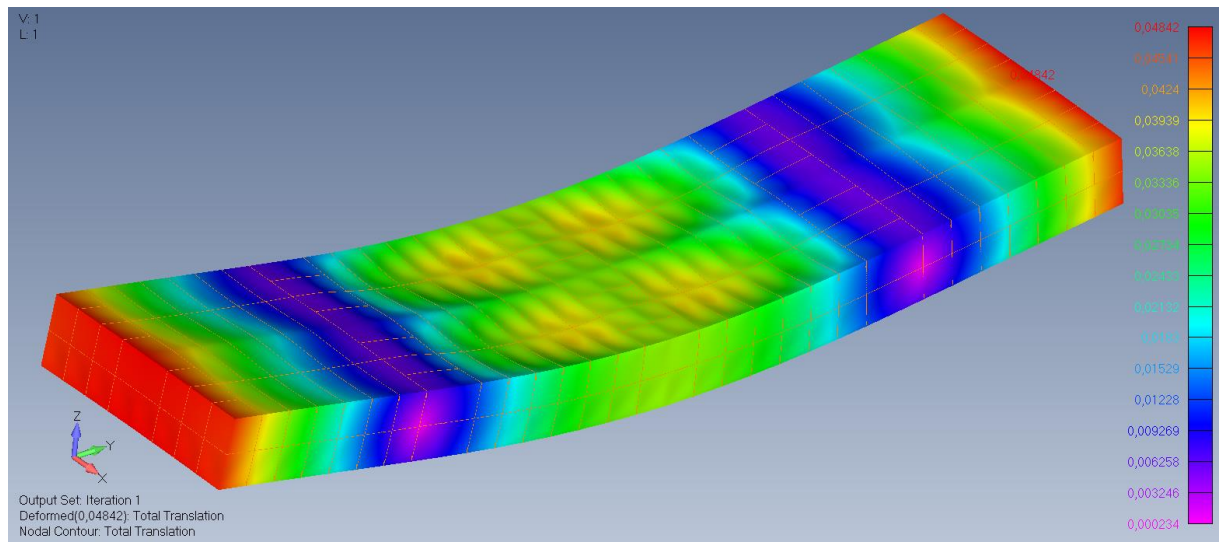


Рисунок 4.2 – Картина деформированного состояния конструкции №1 на итерации №1.1

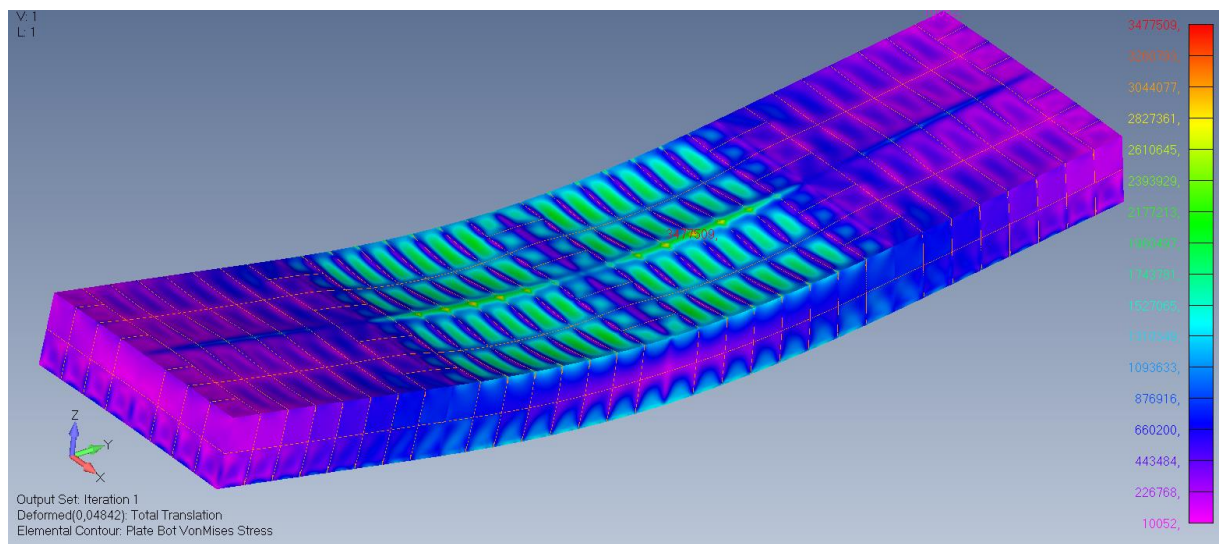


Рисунок 4.3 – Картина напряжений в пластинчатых элементах на итерации №1.1

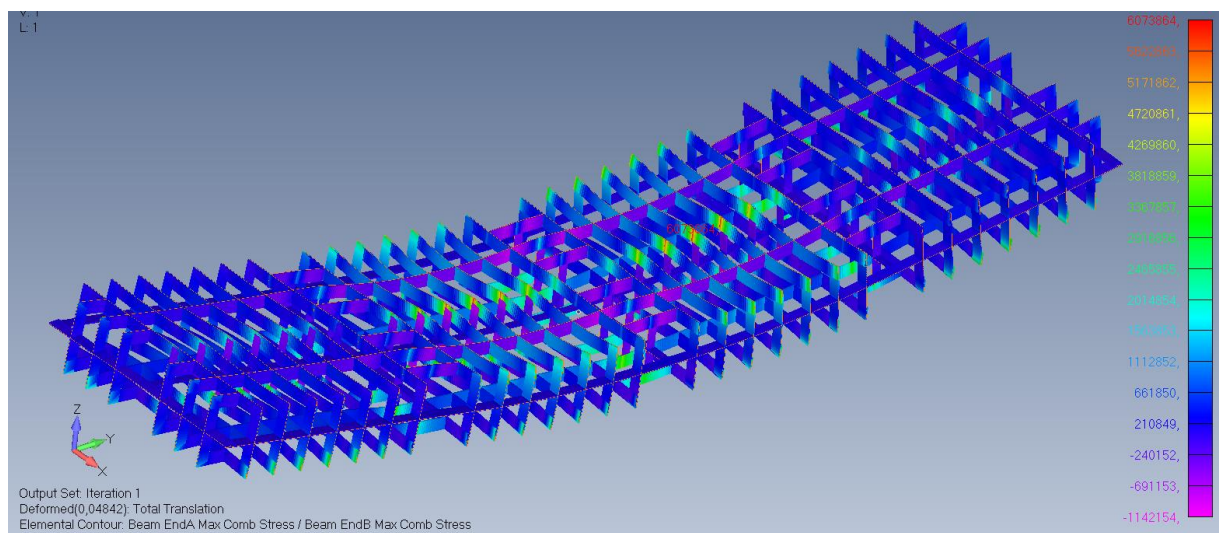


Рисунок 4.4 – Картина напряжений в балочных элементах на итерации №1.1

Данные, представленные в таблице 4.6, свидетельствуют о достаточном запасе по устойчивости и жесткости, при этом фактические значения напряжений превышают допускаемые. В то же время, согласно таблице 4.5, подавляющее большинство связей имеет избыточную прочность, за исключением бимсов в рамках 2 и 3 блока.

Таким образом, имеется возможность уменьшить размеры большинства связей, за исключением бимсов на 2 и 3 блоке, которые требуется увеличить. В результате изменения размеров отдельных связей конструкции, меняется ее масса, следовательно, общее водоизмещение, значение силы тяжести, осадки и гидростатического давления. Так, формируется следующая итерация расчетов с обновленными исходными данными.

Подобным образом выполнено 11 итераций расчетов с последовательным уменьшением/усилением размеров связей. Размеры элементов конструкции №1 на финальной итерации представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Размеры связей конструкции №1 на итерации №1.11

Перекрытие	Связь	Блок 1		Блок 2		Блок 3		Блок 4	
		t, мм	b, мм	t, мм	b, мм	t, мм	b, мм	t, мм	b, мм
Палуба	Настил	12	-	18	-	18	-	12	-
	Карлингс	10	90	10	90	10	90	10	90
	Бимс	20	180	30	270	30	270	20	180
Днище	Обшивка	12	-	14	-	14	-	12	-
	Шпангоут	28	230	28	240	28	240	28	230
	Стрингер	24	200	28	240	28	240	24	200
Борт	Обшивка	12	-	12	-	12	-	12	-
	Шпангоут	10	90	10	90	10	90	10	90
Переборка	Обшивка	14	-	14	-	14	-	14	-
	Стойка	18	160	20	180	20	180	18	160

Масса конструкции на финальной итерации – 4645 кг, осадка – 0, 485 мм, максимальное гидростатическое давление – 4758 Па.

На рисунках 4.5 и 4.6 представлены картины деформированного состояния корпуса причала, на рисунке 4.7. – картина напряжений в пластинчатых элементах, на рисунке 4.8. – в балочных элементах. В таблице 4.8. представлены значения максимальных напряжений в группах связей поблочно, в таблице 4.9 – проверка соответствия принятых критериев прочности, жесткости и устойчивости.

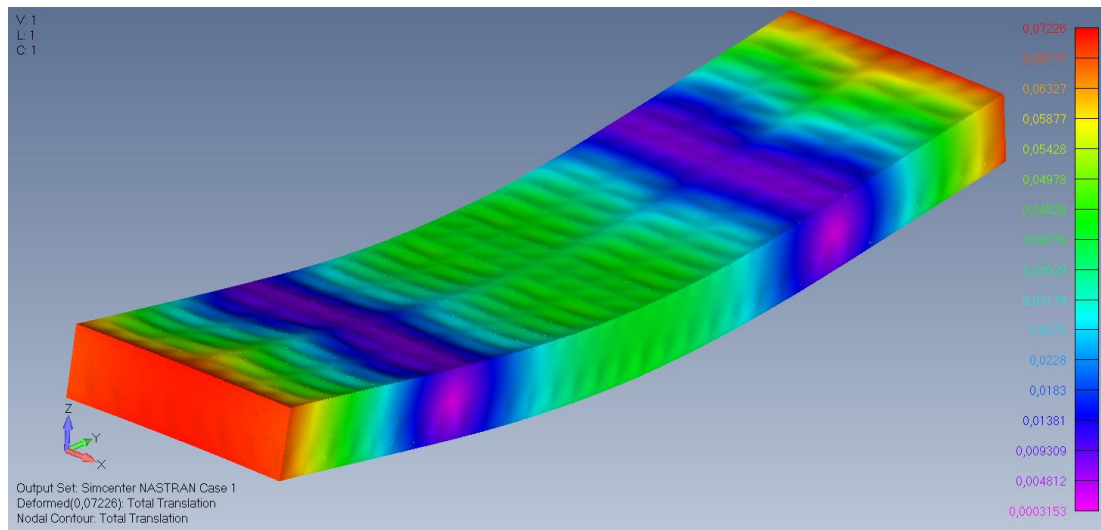


Рисунок 4.5 – Картина деформированного состояния конструкции №1 на итерации №1.11
(вид на палубу)

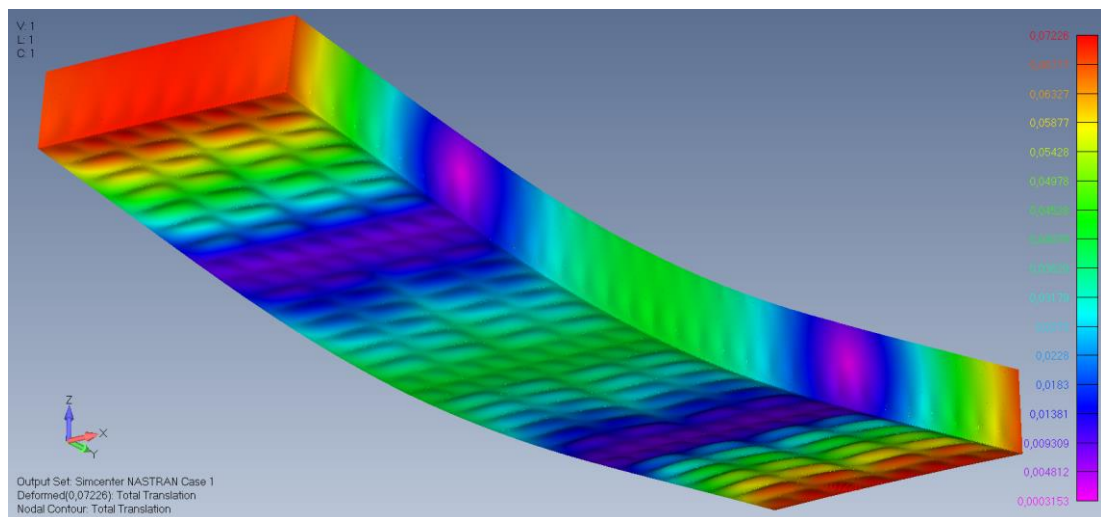


Рисунок 4.6 – Картина деформированного состояния конструкции №1 на итерации №1.11
(вид на днище)

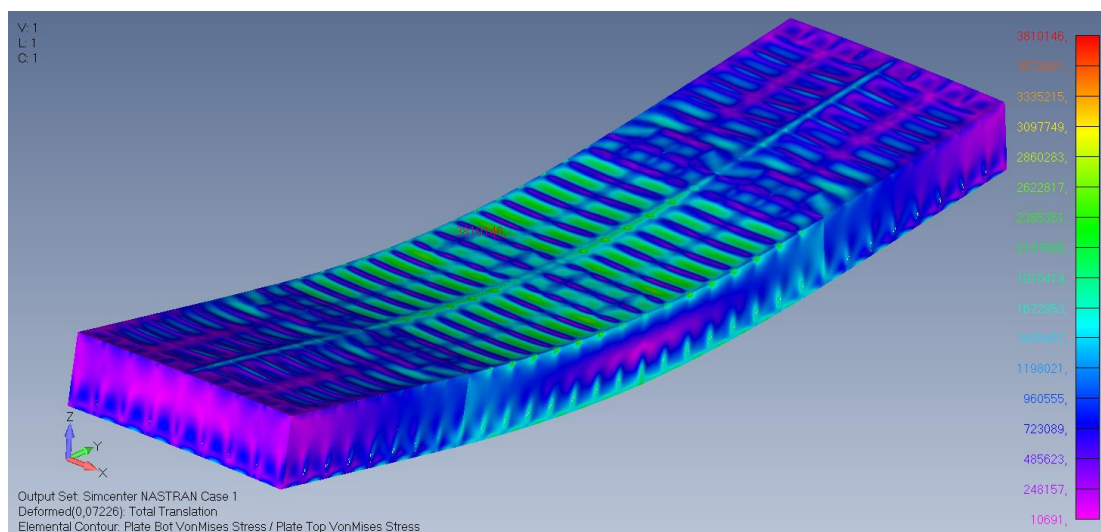


Рисунок 4.7 – Картина напряжений в пластинчатых элементах на итерации №1.11

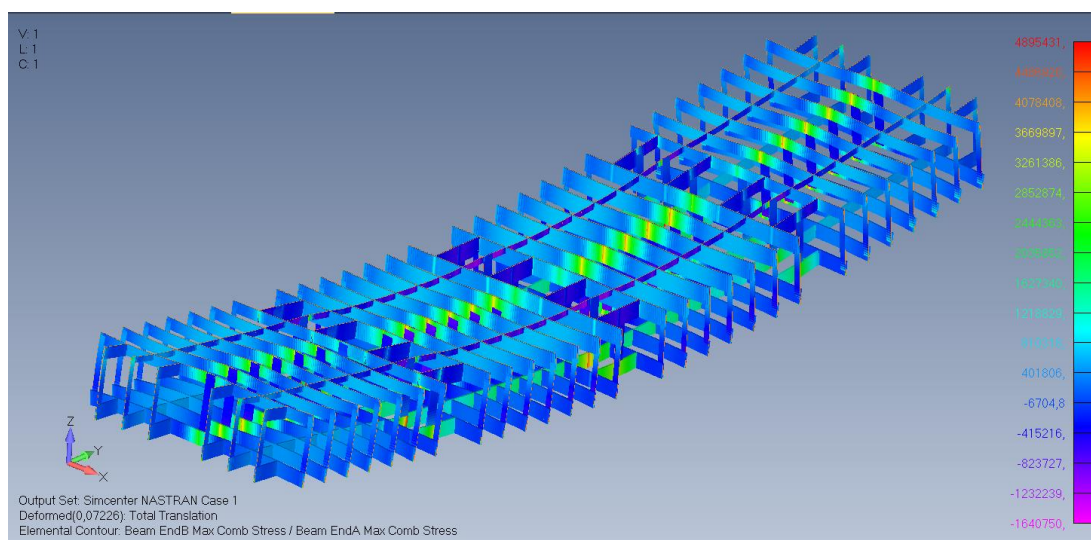


Рисунок 4.8 – Картина напряжений в балочных элементах на итерации №1.11

Таблица 4.8 – Максимальные напряжения в группах связей поблочно на итерации №1.11

Перекрытие	Связь	Максимальное напряжение, МПа			
		Блок №1	Блок №2	Блок №3	Блок №4
Палуба	Настил	3,18	4,18	4,18	3,18
	Карлингс	2,70	4,07	4,07	2,70
	Бимс	4,43	4,30	4,30	4,43
Днище	Обшивка	3,67	3,99	3,99	3,67
	Шпангоут	4,24	3,94	3,94	4,24
	Стрингер	4,74	4,62	4,62	4,74
Борт	Обшивка	1,90	2,58	2,58	1,90
	Шпангоут	4,02	3,20	3,20	4,02
Переборка	Обшивка	2,62	3,23	3,23	2,62
	Стойка	4,87	4,77	4,77	4,87

Таблица 4.9 – Соответствие результатов расчета принятым критериям прочности, жесткости и устойчивости на итерации №1.11

Критерий	Пороговое значение	Фактическое значение
Максимальный прогиб пластины, мм	12,5	9,10
Максимальный прогиб корпуса, мм	80	71,1
Максимальные напряжения, МПа	4,55	4,88
Коэффициент потери устойчивости	1,0	0,95

По результатам выполненного расчета, максимальные перемещения наблюдаются на ячейке днищевой пластины в носовой части конструкции. Максимальные напряжения – на поперечных стойках переборок в районе их соединения с днищевыми балками.

По результатам одиннадцати итераций расчетов удалось снизить массу на 19,7% относительно ее первоначального значения. При этом напряжения практически во всех связях

приблизились к допускаемым значениям, но более не могут быть снижены ввиду того, что коэффициент потери устойчивости меньше 1,0. Тем не менее, согласно таблице 4.8, в некоторых связях фактические напряжения превышают допускаемые значения, что может быть связано с идеализацией расчетной модели, не предусматривающей корректное соединение балок между собой. Для получения корректных значений напряжений и деформаций, выполнен расчет пластинчатой модели данной конструкции с учетом размеров связей, представленных в таблице 4.8. Пример конструкции одного из отсеков представлен в приложении В. С целью предупреждения возникновения дополнительных точек сингулярности, соединение балок набора между собой в одной плоскости (днищевое шпангоута/бортового шпангоута или бортового шпангоута/бимса и т.д.) выполнено с помощью сопряжения, радиусом, равным меньшей из высот соединяемых балок.

Анализ рисунков 4.2, 4.5 и 4.6 показывает, что конструкция, в рассматриваемом расчетном случае прогибается относительно двух областей, расположенных посередине высоты поперечных водонепроницаемых переборок. С целью упрощения выполнения последующих расчетов, выполнен сравнительный расчет прочности пластинчатой модели в двух конфигурациях:

1. расчет П.1 – при отсутствии закреплений и использовании сил инерции;
2. расчет П.2 – при отсутствии сил инерции и использовании закрепления в виде шарнирной опоры по всей ширине двух водонепроницаемых переборок на середине их высоты. Линии закреплений представлены на рисунке 4.9.

На рисунке 4.10 представлена картина деформированного состояния конструкции в рамках расчета П.1, на рисунке 4.11 – в рамках расчета П.2. На рисунке 4.12 показана картина напряженного состояния конструкции при расчете П.1, на рисунке 4.13 – укрупненная область максимальных напряжений по результатам расчета П.1.

В таблице 4.10. представлено краткое сравнение результатов расчета и принятых критериев прочности, жесткости и устойчивости.

Таблица 4.10 – Соответствие результатов расчета принятым критериям прочности, жесткости и устойчивости в пластинчатой модели

Критерий	Пороговое значение	Расчет П.1	Расчет П.2	Разница между расчетами, %
Максимальный прогиб пластины, мм	12,5	9,55	9,60	0,52
Максимальный прогиб корпуса, мм	80	73,1	74,9	2,46
Максимальные напряжения, МПа	4,55	3,91	3,74	4,34
Коэффициент потери устойчивости	1,0	1,46	1,46	0

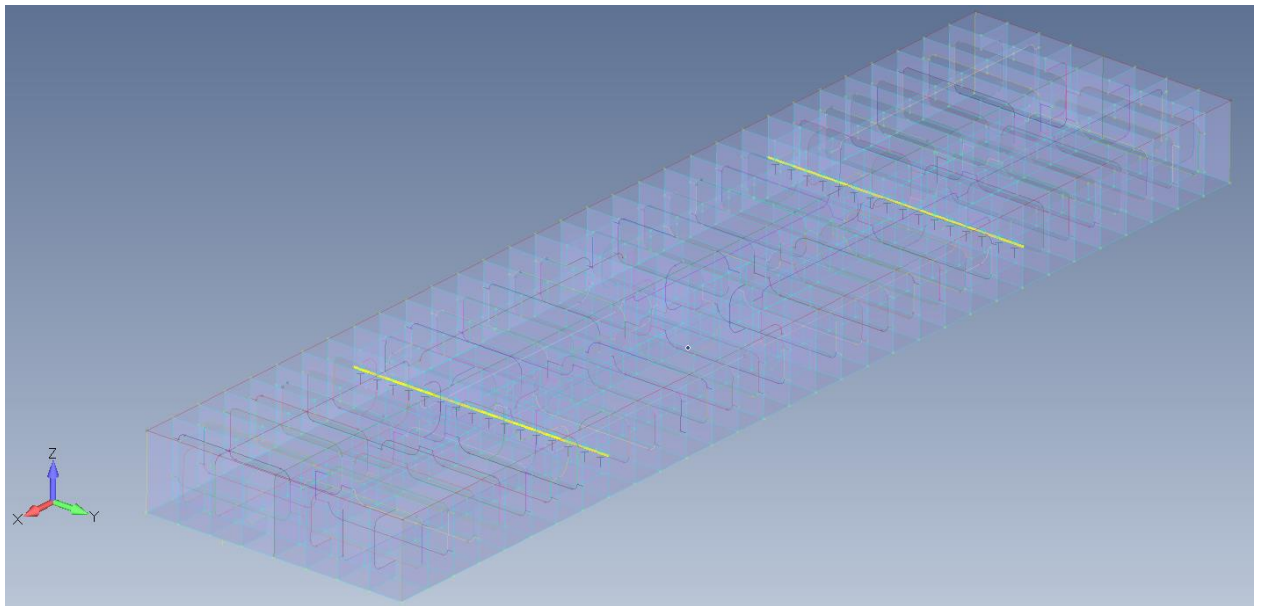


Рисунок 4.9 – Шарнирные опоры на поперечных водонепроницаемых переборках

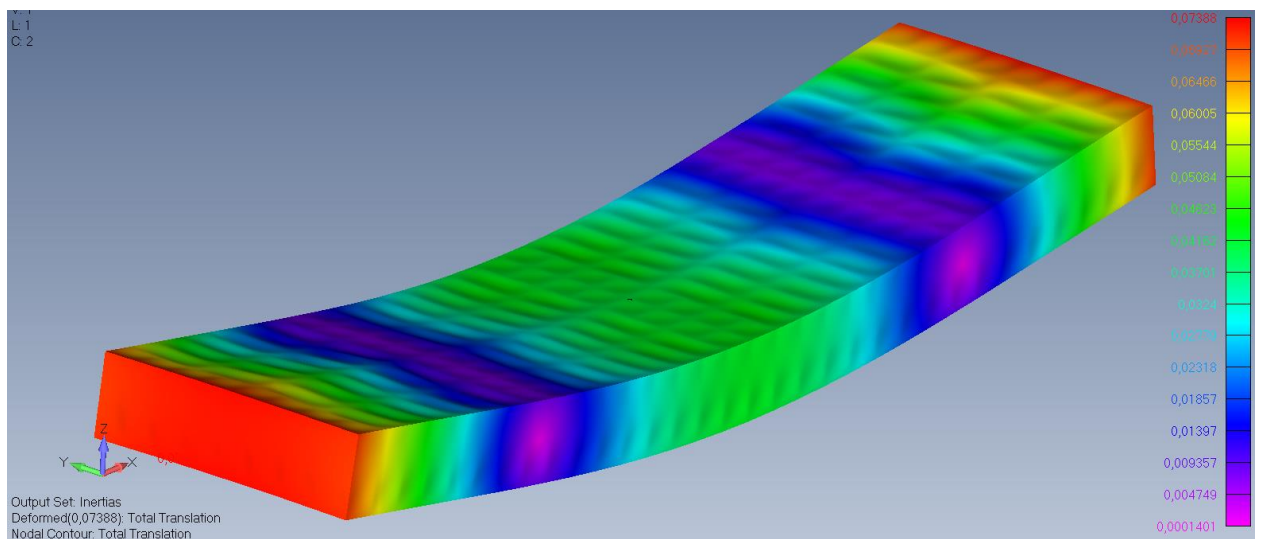


Рисунок 4.10 – Картина деформированного состояния конструкции при расчете П.1.

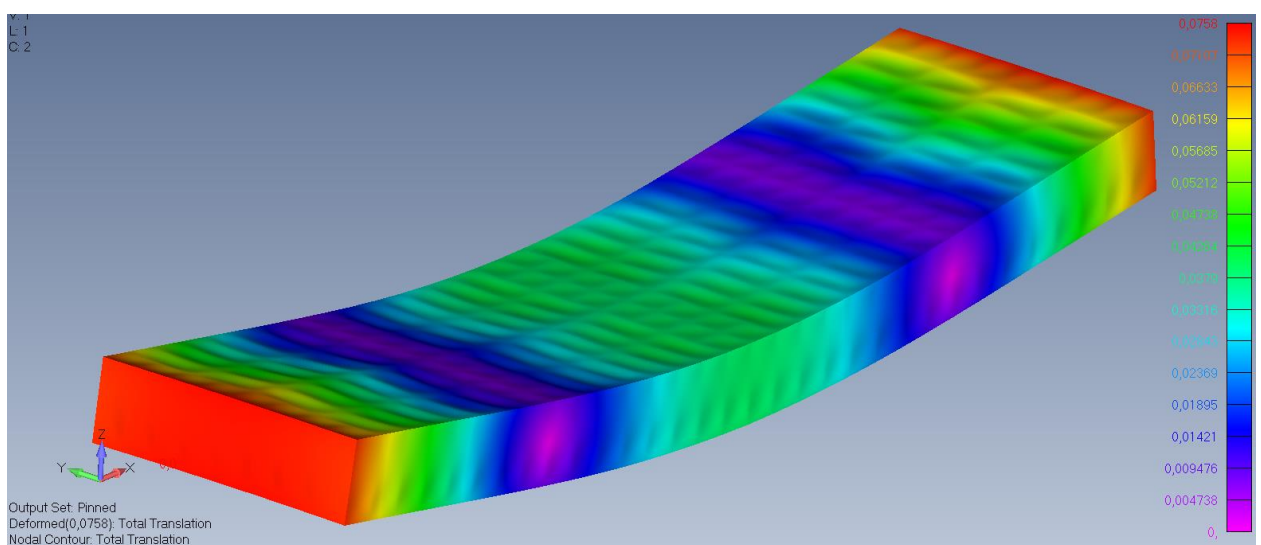


Рисунок 4.11 – Картина деформированного состояния конструкции при расчете П.2.

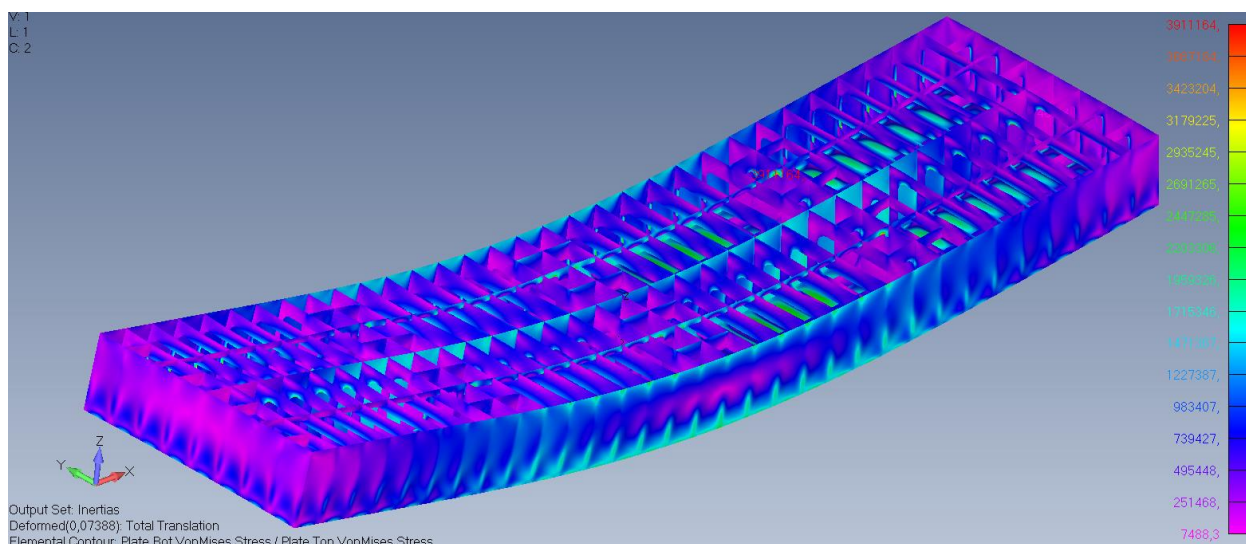


Рисунок 4.12 – Картина напряженного состояния конструкции при расчете П.1. (настил палубы не показан)

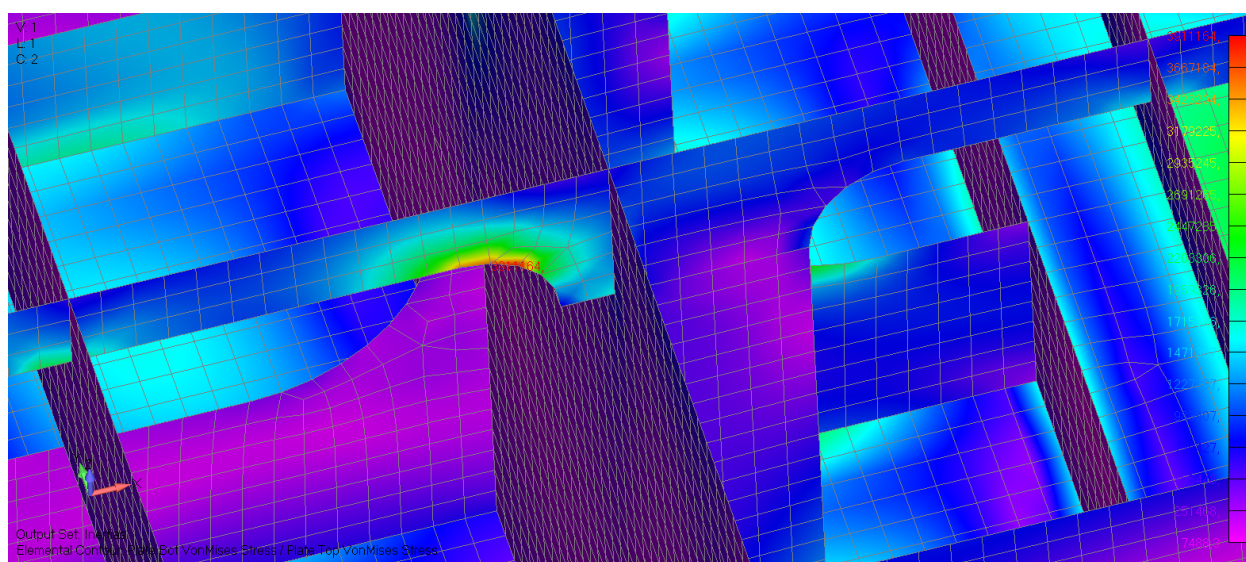


Рисунок 4.13 – Область максимальных напряжений по результатам расчета П.1.

Картины общего деформированного состояния, полученные по результатам расчетов П.1 и П.2 практически идентичны. Максимальные значения перемещений в обоих расчетах наблюдаются на одних и тех же пластинах днищевой обшивки в районе носовой оконечности.

Значения максимальных напряжений наблюдаются в районе притыкания карлингса к поперечной водонепроницаемой переборке. При этом, данное значение напряжения может быть впоследствии уменьшено путем проработки конструкции данного узла соединения.

Результаты расчета П.1 показывают соответствие всем установленным критериям расчета, поэтому размеры связей, представленные в таблице 4.8 принимаются в качестве итоговых на II этапе предлагаемой методики проектирования для конструкции №1.

Разница между расчетами П.1 и П.2 по максимальным значениям не превышает 5%, в связи с чем для выполнения последующих расчетов пластинчатых моделей использовалось шарнирное закрепление на поперечных переборках.

4.3.3 Проектирование конструкции №2

Определение размеров связей конструкции №2 выполнено аналогично алгоритму, описанному в п. 4.3.2.

Критерии прочности и жесткости, согласно требованиям итальянских Правил, представлены в п. 3.1.1. данной работы. Для выполнения конечно-элементного анализа, с ошибкой в безопасную сторону, принимаются критерии, согласно таблице 4.11. Критерий потери устойчивости также должен быть больше 1,0. Расчет выполнен в 4 итерации. Размеры связей на последней итерации представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.11 – Критерии прочности и жесткости на этапе предварительного проектирования ККС из ПНД ЛЛ по Правилам RINA

Тип связи	Допускаемое напряжение	Допускаемое перемещение
Пластины	$\sigma_{mis} = 0,62R_{\text{ПНД}}$	$y_{max} = 0,025s$
Балки набора	$\sigma_{mis} = 0,51R_{\text{ПНД}}$	-
Корпус в целом	-	$y_{max} = \frac{1}{150}L$

Таблица 4.12 – Размеры связей конструкции №2 на итерации №2.4

Перекрытие	Связь	Блок 1		Блок 2		Блок 3		Блок 4	
		t, мм	b, мм	t, мм	b, мм	t, мм	b, мм	t, мм	b, мм
Палуба	Настил	12	-	18	-	18	-	12	-
	Карлингс	10	90	10	90	10	90	10	90
	Бимс	16	160	16	160	16	160	16	160
Днище	Обшивка	12	-	14	-	14	-	12	-
	Шпангоут	16	160	16	160	16	160	16	160
	Стрингер	16	160	16	160	16	160	16	160
Борт	Обшивка	12	-	12	-	12	-	12	-
	Шпангоут	10	90	10	90	10	90	10	90
Переборка	Обшивка	14	-	14	-	14	-	14	-
	Стойка	16	160	16	160	16	160	16	160

Масса конструкции на финальной итерации – 3602 кг, осадка – 0,469 мм, максимальное гидростатическое давление – 4601 Па.

Согласно таблице 4.12, самая маленькая балка набора – полоса 90x10 мм, установленная на обшивку, толщиной 12 мм. При учете присоединенного пояса, шириной, равной шпации

(500 мм) момент сопротивления балки составит $30,4 \text{ см}^3$, что больше минимального нормируемого значения (15 см^3).

По результатам балочно-пластинчатого расчета, на рисунке 4.14 представлена картина деформированного состояния конструкции, на рисунке 4.15 – картина напряжений в пластинчатых элементах, на рисунке 4.16 – в балочных элементах.

В таблице 4.13. представлены значения максимальных напряжений в группах связей поблочно, в таблице 4.14 – проверка соответствия принятых критериев прочности, жесткости и устойчивости результатам расчета.

Таблица 4.13 – Максимальные напряжения в группах связей поблочно на итерации №2.4

Перекрытие	Связь	Максимальное напряжение, МПа			
		Блок №1	Блок №2	Блок №3	Блок №4
Палуба	Настил	3,63	4,42	4,42	3,63
	Карлингс	2,75	7,90	7,90	2,75
	Бимс	5,79	12,4	12,4	5,79
Днище	Обшивка	3,63	3,78	3,78	3,63
	Шпангоут	10,3	9,88	9,88	10,3
	Стрингер	8,16	6,95	6,95	8,16
Борт	Обшивка	2,01	2,62	2,62	2,01
	Шпангоут	6,92	3,89	3,89	6,92
Переборка	Обшивка	2,63	3,60	3,60	2,63
	Стойка	4,38	6,00	6,00	4,38

Таблица 4.14 – Соответствие результатов расчета принятым критериям прочности, жесткости и устойчивости на итерации №2.4 в балочно-пластинчатой модели

Критерий	Пороговое значение	Фактическое значение
Максимальный прогиб пластины, мм	12,5	6,68
Максимальный прогиб корпуса, мм	107	70,6
Максимальные напряжения в пластинах, МПа	12,3	4,42
Максимальные напряжения в балках, МПа	10,1	12,4
Коэффициент потери устойчивости	1,0	0,67

Данные, представленные в таблицах 4.13 и 4.14, свидетельствуют о достаточном запасе прочности и жесткости для полученной конструкции, в то время как коэффициент потери устойчивости оказался ниже порогового значения.

Для уточнения полученных результатов, выполнен расчет пластинчатой модели конструкции №2 с учетом размеров связей, представленных в таблице 4.13.

Расчет выполнен из условия шарнирного закрепления конструкции на поперечных водонепроницаемых переборках (см. рисунок 4.9).

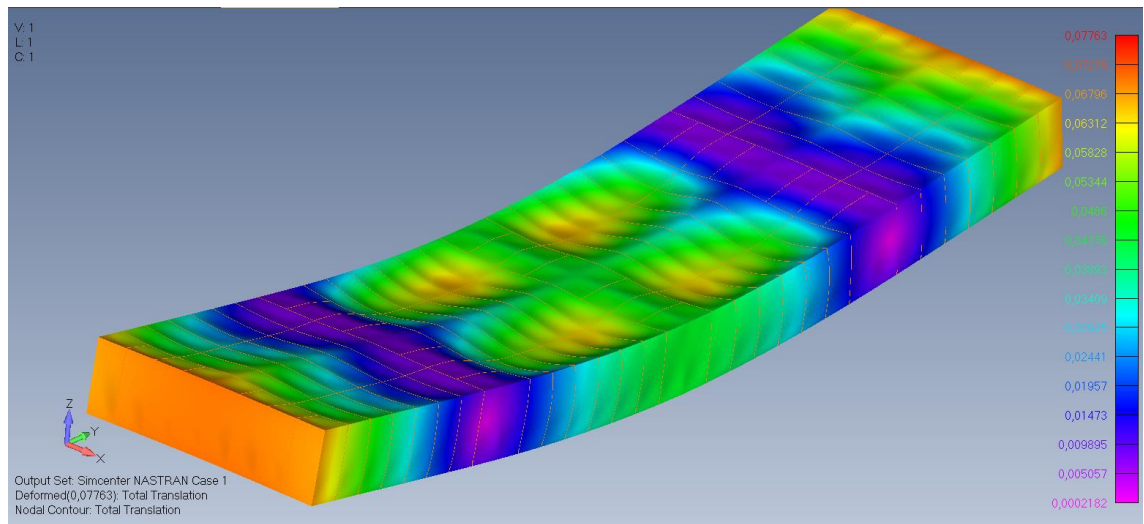


Рисунок 4.14 – Картина деформированного состояния конструкции на итерации №2.4

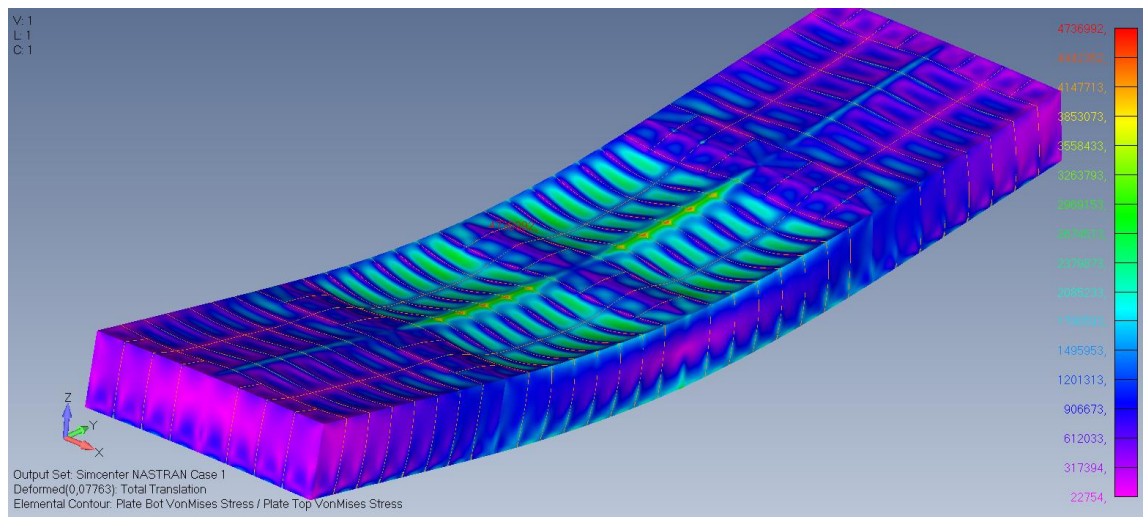


Рисунок 4.15 – Картина напряжений в пластинчатых элементах на итерации №2.4

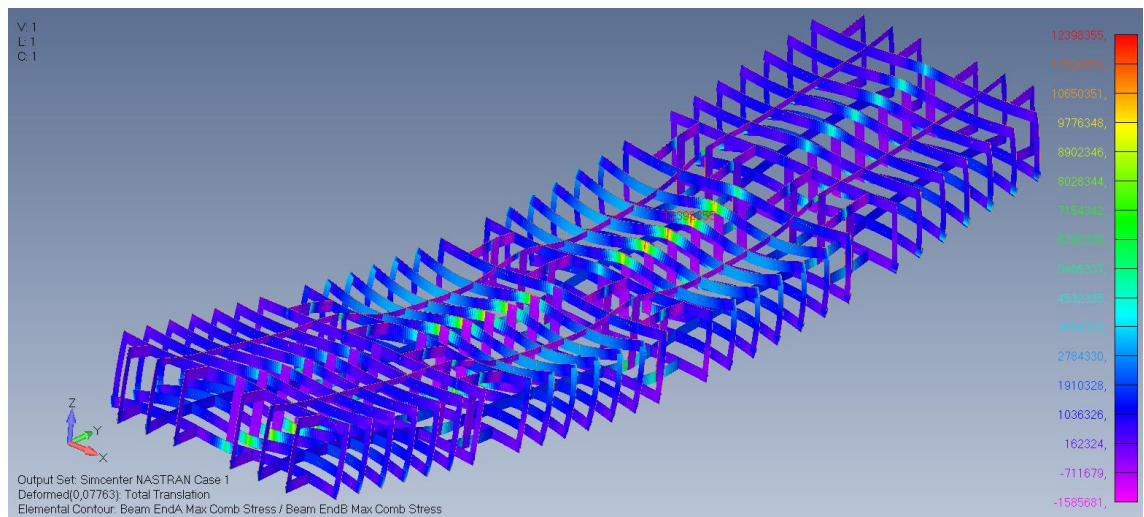


Рисунок 4.16 – Картина напряжений в балочных элементах на итерации №2.4

На рисунке 4.17 представлена картина деформированного состояния конструкции, на рисунке 4.18 – картина напряженного состояния со снятой палубой.

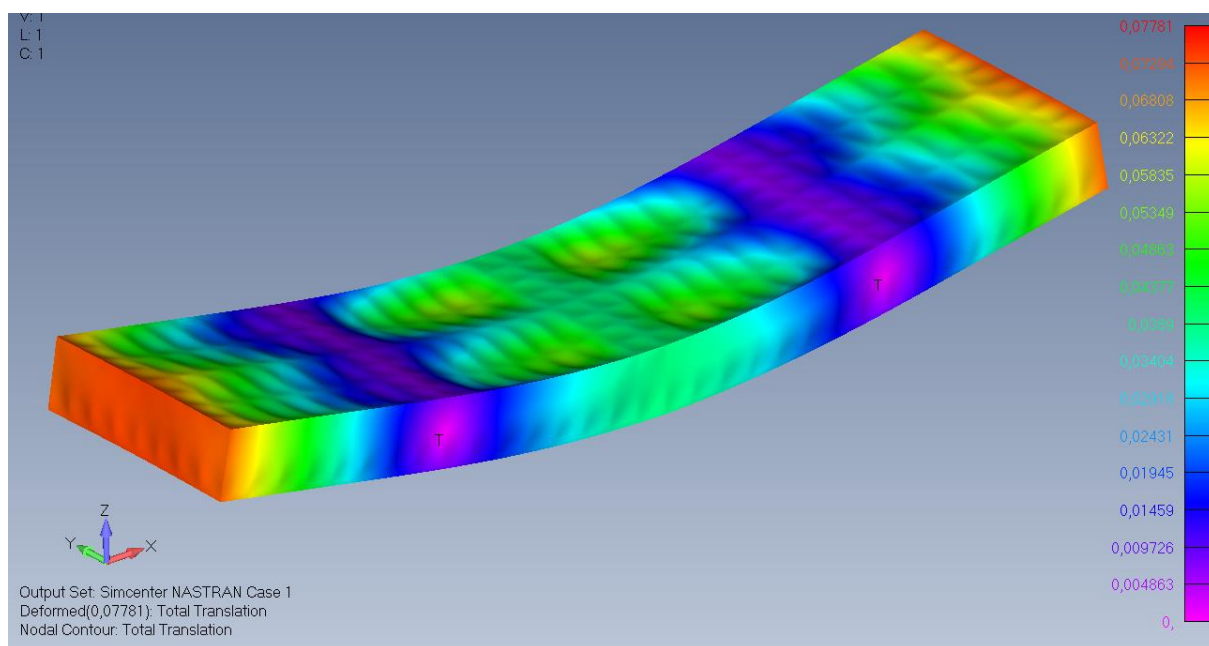


Рисунок 4.17 – Картина деформированного состояния пластинчатой модели конструкции №2 на итерации 2.4

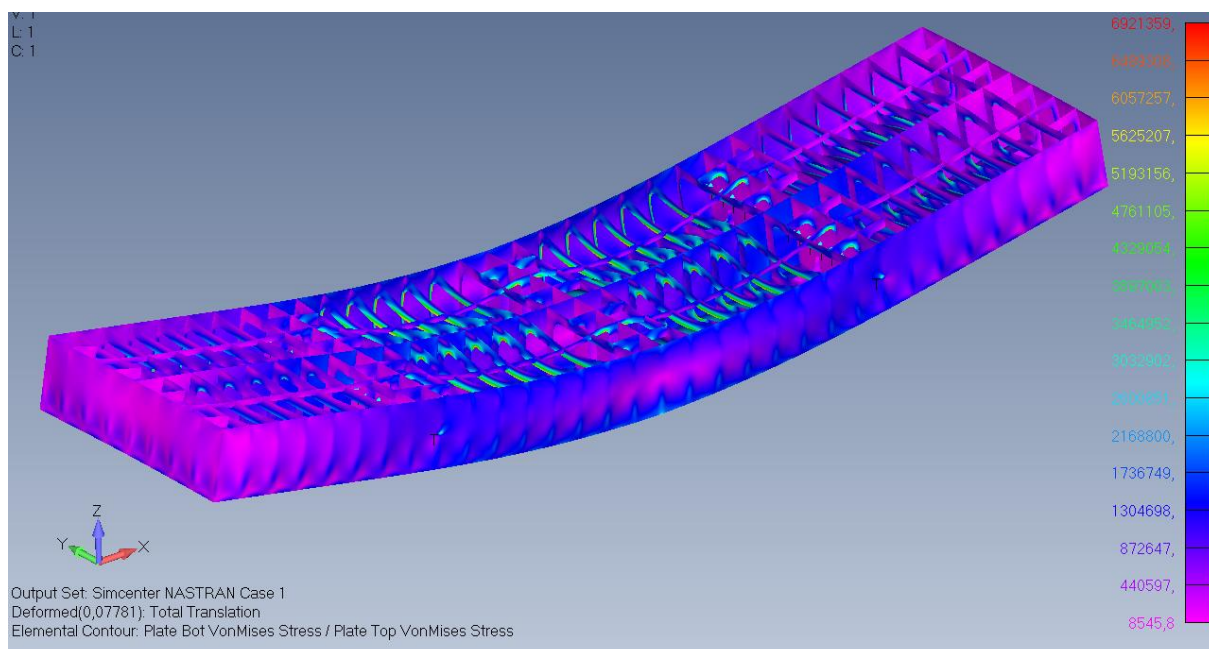


Рисунок 4.18 – Картина напряженного состояния пластинчатой модели конструкции №2 на итерации №2.4 (настил палубы не показан)

Результаты расчета представлены в таблице 4.15. Согласно полученным данным, все фактические значения соответствуют установленным критериям. Несмотря на возможность

проведения оптимизации конструкции по критериям прочности и жесткости, критерий устойчивости оказался исчерпанным, поэтому размеры связей, представленные в таблице 4.13 принимаются в качестве итоговых на II этапе проектирования конструкции причала №2.

Таблица 4.15 – Соответствие результатов расчета принятым критериям прочности, жесткости и устойчивости на итерации №2.4 в пластинчатой модели

Критерий	Пороговое значение	Фактическое значение
Максимальный прогиб пластины, мм	12,5	6,68
Максимальный прогиб корпуса, мм	107	73,2
Максимальные напряжения в пластинах, МПа	12,3	3,75
Максимальные напряжения в балках, МПа	10,1	6,92
Коэффициент потери устойчивости	1,0	1,03

4.3.4 Проектирование конструкции №3

Определение размеров связей конструкции №3 выполнено аналогично алгоритму, описанному в п. 4.3.2 и п. 4.3.3.

Критерии прочности и жесткости представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Критерии прочности и жесткости при проектировании конструкции из НПВХ ВХЗ

Тип связи	Допускаемое напряжение	Допускаемое перемещение
Пластины	$\sigma_{mis} = 0,45R_{\text{НПВХ}}$	$y_{max} = 0,025s$
Балки набора	$\sigma_{mis} = 0,45R_{\text{НПВХ}}$	-
Корпус в целом	-	$y_{max} = \frac{1}{200}L$

Примечание: s – шпация (0,5 м), L – длина причала (16,0 м), $R_{\text{НПВХ}}$ – предел текучести НПВХ ВХЗ на растяжение (42,4 МПа).

Критерий потери устойчивости также должен быть больше 1,0.

Материал корпуса – НПВХ ВХЗ со следующими физико-механическими свойствами:

- плотность – 1450 кг/м³;
- модуль упругости – 2750 МПа;
- коэффициент Пуассона – 0,337.

Расчетный случай – согласно п. 4.1. Моделирование без закреплений, с применением сил инерции.

Размер элементов – 30 мм.

Тип расчета – линейный статический анализ.

Расчет выполнен в 5 итерации. Размеры связей на последней итерации представлены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Размеры связей конструкции №3 на итерации №3.5

Перекрытие	Связь	Блок 1		Блок 2		Блок 3		Блок 4	
		t, мм	b, мм	t, мм	b, мм	t, мм	b, мм	t, мм	b, мм
Палуба	Настил	8	-	12	-	12	-	8	-
	Карлингс	6	50	6	50	6	50	6	50
	Бимс	12	90	16	140	16	140	12	90
Днище	Обшивка	8	-	8	-	8	-	8	-
	Шпангоут	16	140	16	140	16	140	16	140
	Стрингер	10	80	10	80	10	80	10	80
Борт	Обшивка	8	-	8	-	8	-	8	-
	Шпангоут	6	50	6	50	6	50	6	50
Переборка	Обшивка	8	-	8	-	8	-	8	-
	Стойка	6	50	10	80	10	80	6	50

Масса конструкции корпуса причала составила 3388 кг, осадка – 466 мм, максимальное гидростатическое давление – 4751 Па.

По результатам расчета балочно-пластинчатой модели, на рисунке 4.19 представлена картина деформированного состояния конструкции, на рисунке 4.20 – картина напряжений в пластинчатых элементах, на рисунке 4.21 – в балочных элементах. В таблице 4.18 представлены значения максимальных напряжений в группах связей поблочно, в таблице 4.19 – проверка соответствия принятых критериев прочности, жесткости и устойчивости результатам расчета.

Таблица 4.18 – Максимальные напряжения в группах связей поблочно на итерации №3.5

Перекрытие	Связь	Максимальное напряжение, МПа			
		Блок №1	Блок №2	Блок №3	Блок №4
Палуба	Настил	7,58	9,16	9,16	7,58
	Карлингс	11,08	14,78	14,78	11,08
	Бимс	17,67	18,17	18,17	17,67
Днище	Обшивка	7,35	9,32	9,32	7,35
	Шпангоут	14,43	15,03	15,03	14,43
	Стрингер	14,45	13,11	13,11	14,45
Борт	Обшивка	4,06	5,06	5,06	4,06
	Шпангоут	12,52	11,14	11,14	12,52
Переборка	Обшивка	8,32	8,02	8,02	8,32
	Стойка	14,81	12,62	12,62	14,81

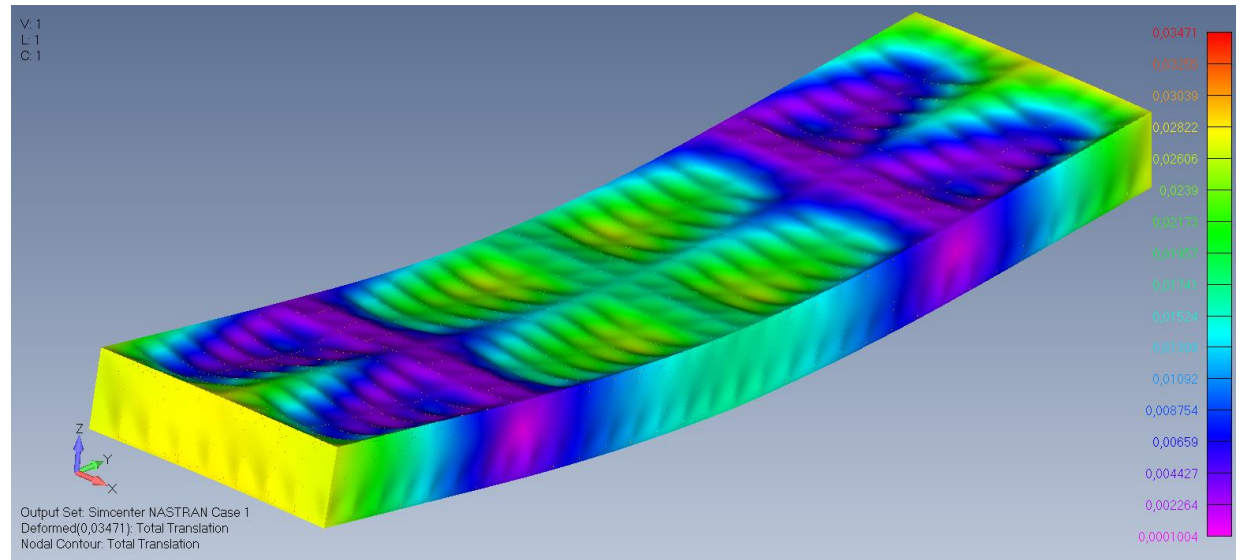


Рисунок 4.19 – Картина деформированного состояния корпуса на итерации №3.5

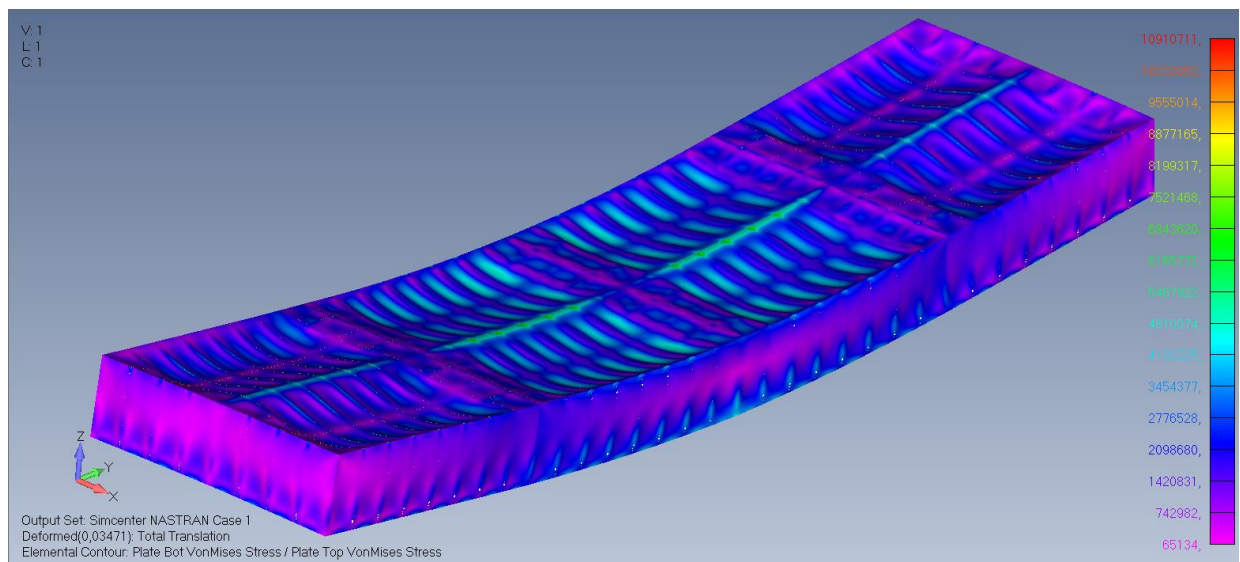


Рисунок 4.20 – Картина напряжений в пластинчатых элементах на итерации №3.5

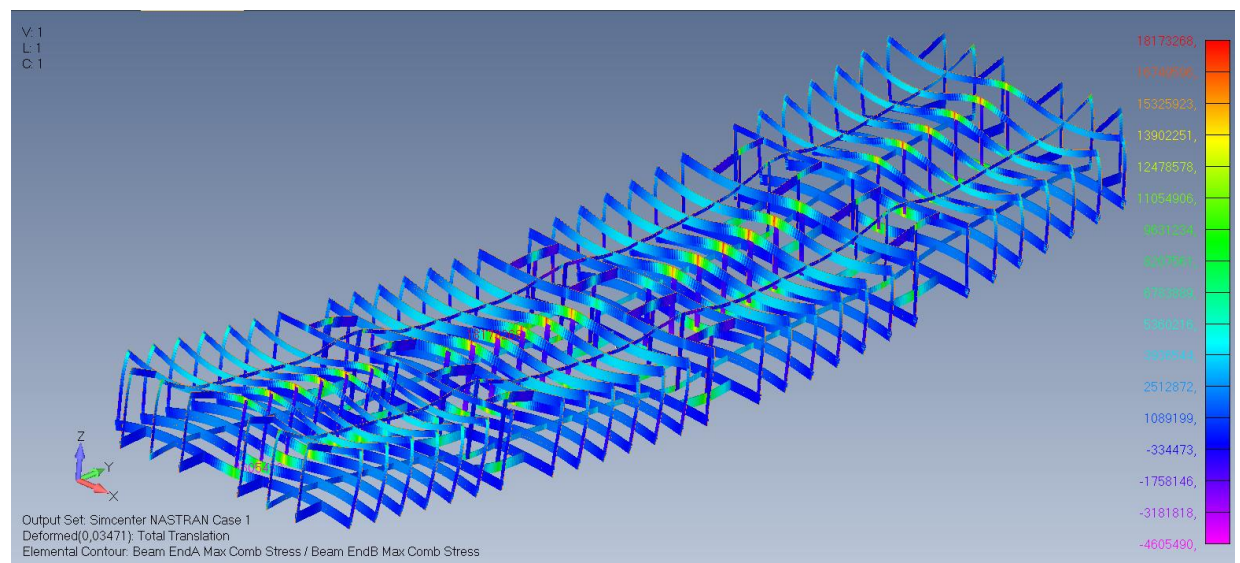


Рисунок 4.21 – Картина напряжений в балочных элементах на итерации №3.5

Таблица 4.19 – Соответствие принятым критериям прочности, жесткости и устойчивости на итерации №3.5

Критерий	Пороговое значение	Фактическое значение
Максимальный прогиб пластины, мм	12,5	5,71
Максимальный прогиб корпуса, мм	80	28,1
Максимальные напряжения, МПа	19,08	18,17
Коэффициент потери устойчивости	1,0	0,82

С целью получения более корректных результатов анализа, дополнительно выполнен расчет пластинчатой модели конструкции. Расчет выполнен из условия закрепления конструкции на поперечных водонепроницаемых переборках, согласно рисунку 4.9.

На рисунках 4.22 и 4.23 представлены картины деформированного состояния конструкции, на рисунке 4.24 – картина напряженного состояния со снятой палубой.

Максимальные перемещения наблюдаются на пластине днищевой обшивки конструкции в районе кормовой оконечности. Максимальные напряжения наблюдаются в узле пересечения бимса и стойки переборки в кормовой части конструкции. В таблице 4.20 представлены сводные результаты расчета пластинчатой модели и их сравнение с пороговыми значениями.

Таблица 4.20 – Соответствие результатов расчета принятым критериям прочности, жесткости и устойчивости на итерации №3.5 в пластинчатой модели

Критерий	Пороговое значение	Фактическое значение
Максимальный прогиб пластины, мм	12,5	5,67
Максимальный прогиб корпуса, мм	80	29,7
Максимальные напряжения, МПа	19,08	17,00
Коэффициент потери устойчивости	1,0	1,18

Согласно полученным данным, прочность, жесткость и устойчивость конструкции соответствуют установленным критериям.

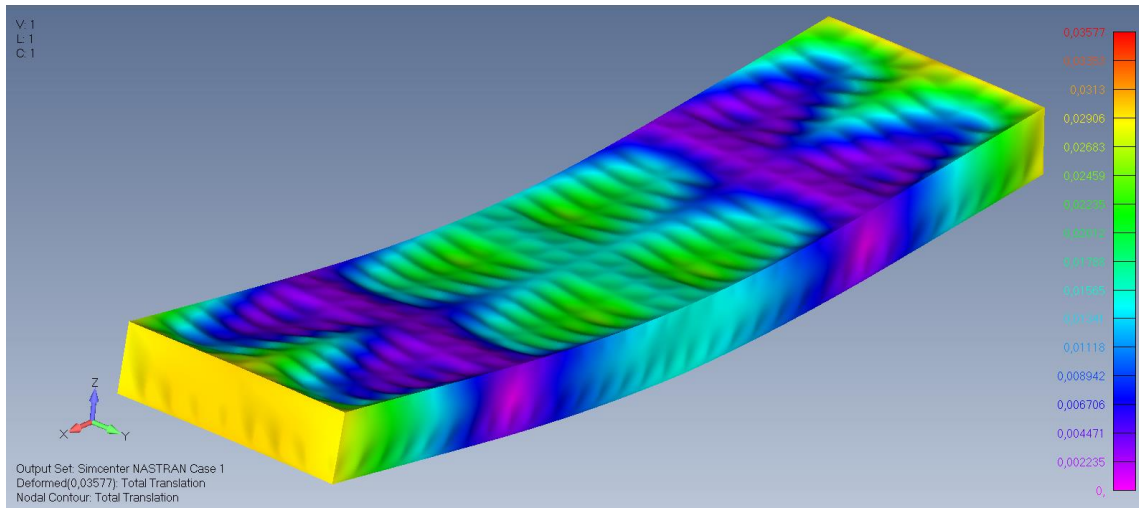


Рисунок 4.22 – Картина деформированного состояния пластинчатой модели конструкции №3 на итерации №3.5 (вид на палубу)

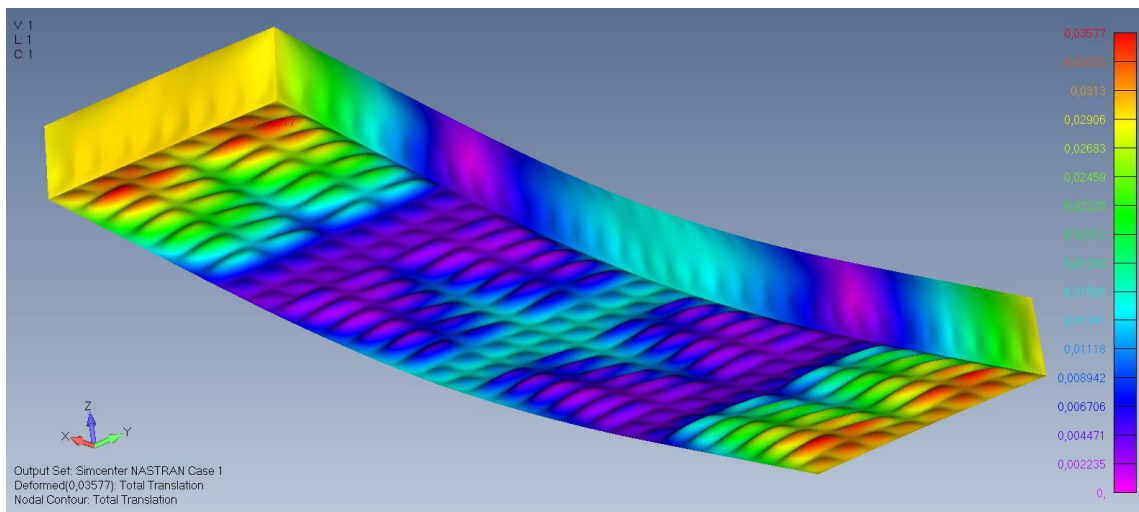


Рисунок 4.23 – Картина деформированного состояния пластинчатой модели конструкции №3 на итерации №3.5 (вид на днище)

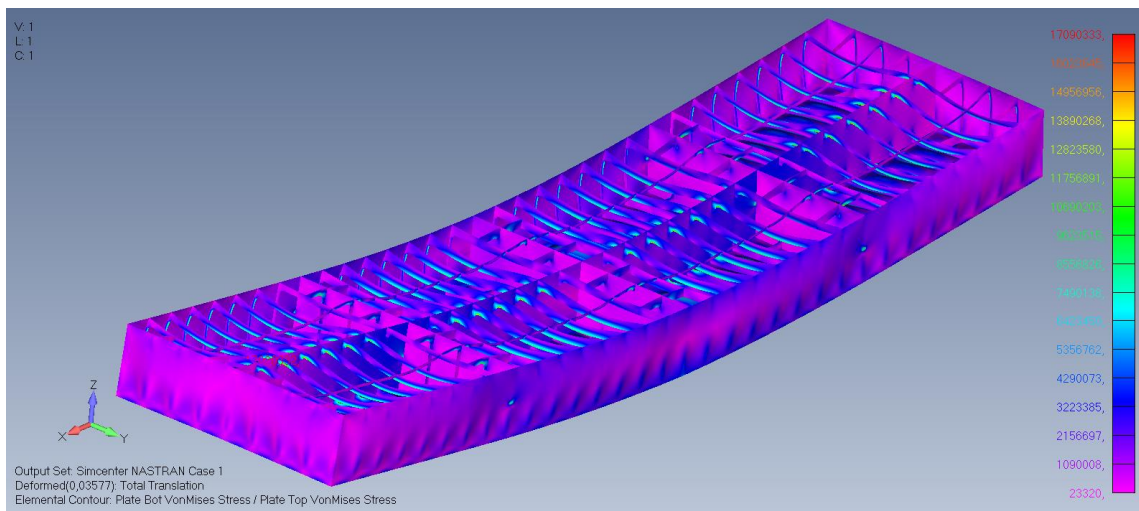


Рисунок 4.24 – Картина напряженного состояния пластинчатой модели конструкции №3 на итерации №3.5 (настил палубы не показан)

4.4 Выполнение проверочных расчетов прочности (III этап)

Проведение проверочных расчетов прочности с использованием СКММ требуется только для конструкций из ПНД ЛЛ, как было указано в п. 3.4. Для выполнения расчетов использована трехсетевая модель термопласта с параметрами, указанными в таблице 3.17.

Расчет выполнен в ПО «Ansys».

Расчетный случай – согласно п. 4.1, но с закреплениями на поперечных водонепроницаемых переборках, согласно рисунку 4.9.

Тип расчета: нелинейный статический анализ.

Критерии прочности и жесткости:

- допускаемое напряжение для пластин и балок: $\sigma_{mis} = 0,57R_{\text{ПНД}}$;
- критическая скорость ползучести на втором этапе: $v_{\text{max}} = 0,324$ мм/час.

Расчетная модель – пластинчатая, без использования балочных элементов.

Размер сетки – 50 мм.

4.4.1 Проверочный расчет прочности конструкции №1

Проверочный расчет прочности конструкции №1 выполнен из условия приложения всех внешних нагрузок в течение 1 секунды, и выдержки полученного напряженно-деформированного состояния конструкции в течение 86 399 с. Таким образом, физическое время расчета составляет 1 день.

Температура конструкции – 22°C.

На рисунке 4.25 представлена картина вертикальных перемещений (вдоль оси Z) конструкции №1 в конечный момент времени, на рисунке 4.26 – картина напряженного состояния конструкции в конечный момент времени.

Как следует из рисунков, наибольшие вертикальные перемещения наблюдаются на участке днищевой обшивки в районе кормовой стенки конструкции, а максимальные напряжения – в районе мидель-шпангоута плавучего причала.

На данном этапе результат расчета в конечный момент времени не является определяющим – для перемещений необходимо исследовать изменение скорости ползучести, а для напряжений – максимальное значение во всем временном интервале расчета, поскольку напряжения релаксируют и перераспределяются по конструкции со временем.

На рисунке 4.27 представлен график изменения прогиба (перемещения по оси Z) от времени для точки на участке днищевой обшивки, в которой наблюдается максимальное значение перемещений, а на рисунке 4.28 – график изменения максимальных напряжений в конструкции от времени.

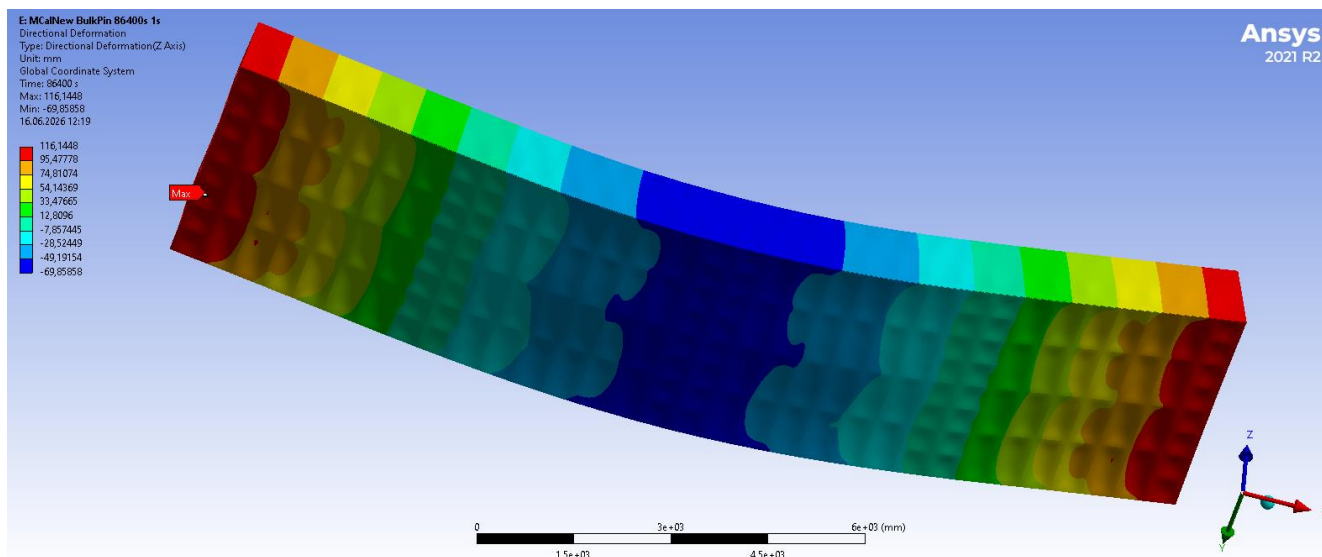


Рисунок 4.25 – Картина вертикальных перемещений в конструкции №1 в момент времени 86 400 с

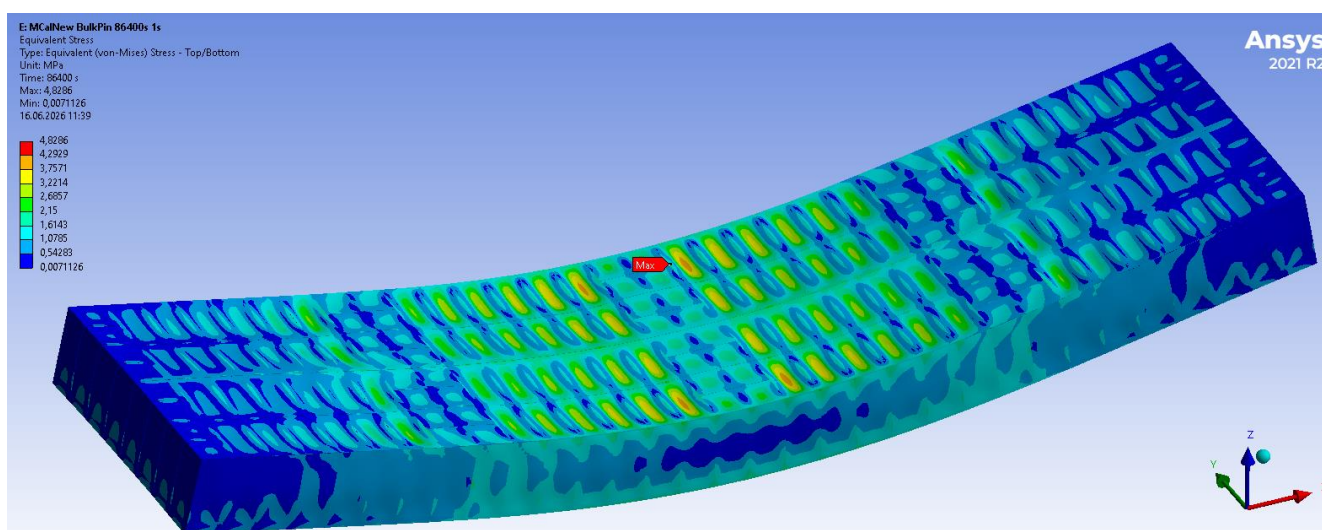


Рисунок 4.26 – Картина напряженного состояния конструкции №1 в момент времени 86 400 с

Характер обоих представленных графиков отражает способность предложенной СКММ учитывать вязкоупругие свойства конструкции.

Как следует из рисунка 4.28, максимальное значение напряжений наблюдается в момент времени 13 824 с и составляет 5,21 МПа (отмечено на графике красной точкой), что ниже допускаемых значений напряжений, составляющих 11,3 МПа.

На рисунке 4.27 однозначно прослеживается первая и вторая ступень ползучести в рассматриваемой точке. На второй ступени ползучести, ее скорость асимптотически уменьшается. На рисунке 4.26 представлен график изменения скорости ползучести с момента времени 20 000 с.

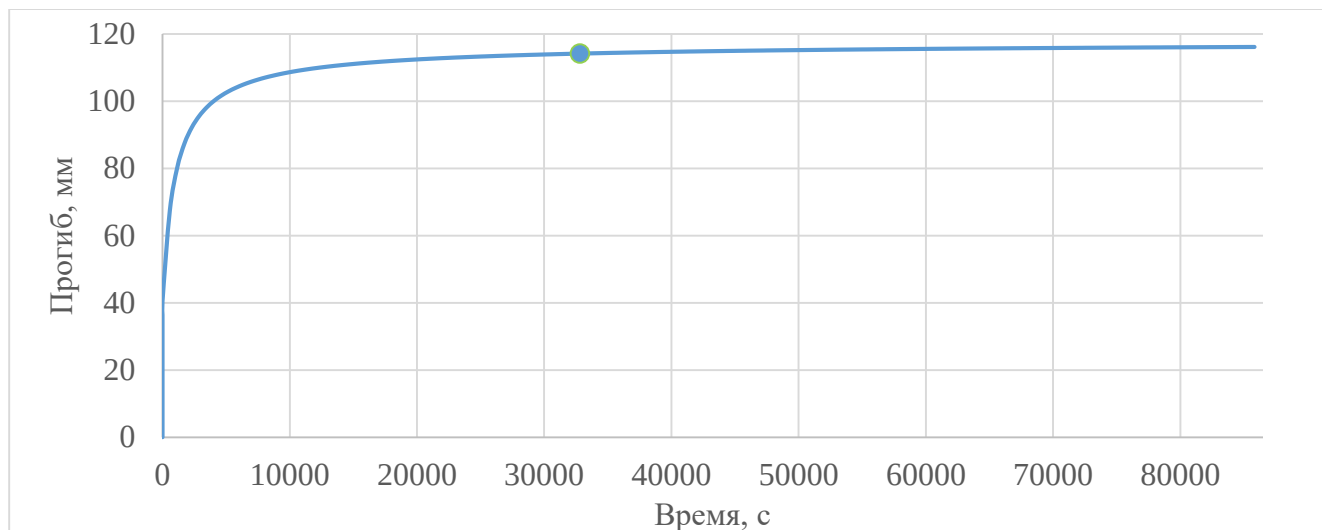


Рисунок 4.27 – График изменения прогиба от времени для точки на днищевой обшивке, в которой наблюдается максимальное значение перемещений (конструкция №1)

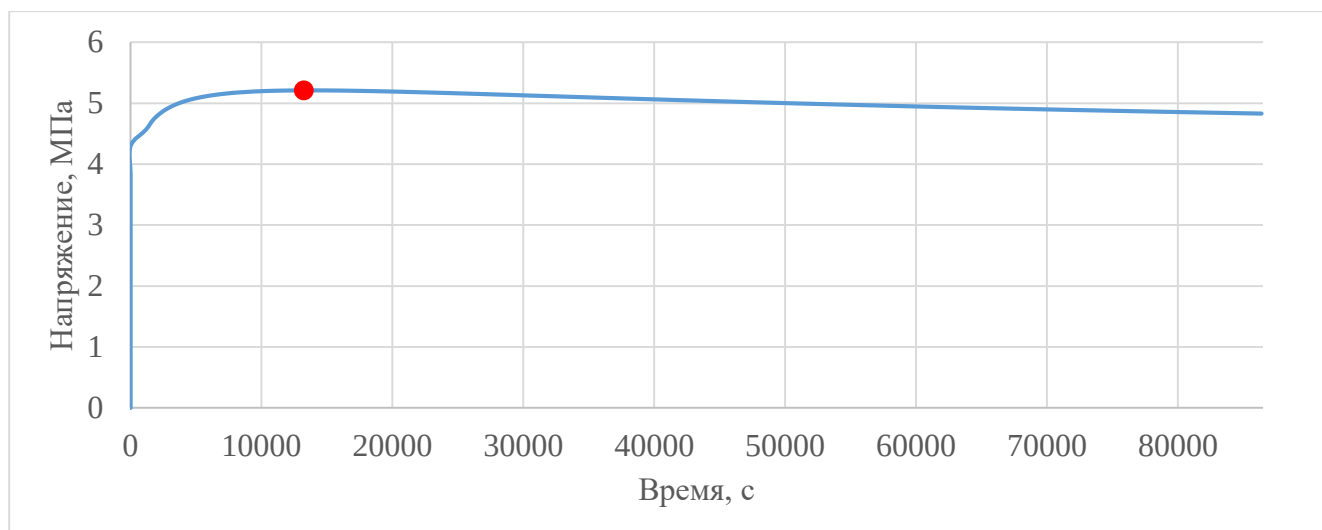


Рисунок 4.28 – График изменения максимальных напряжений в конструкции №1 от времени

В качестве итогового значения скорости ползучести принимается такое, при которой ее изменение не превышает 3%. Данное значение наблюдается в момент времени 33 410 с и составляет 0,0000867 мм/с или 0,312 мм/час (отмечено на графике зеленой точкой). Данное значение меньше нормируемого 0,324 мм/час

Коэффициент потери устойчивости конструкции в конечный момент времени больше 3, что превышает значение 1,46, представленное в таблице 4.10. Это может быть обусловлено тем, что расчетная модель материала на сжатие показывает более жесткие характеристики, чем материал проявляет на самом деле, что отражает необходимость уточнения модели материала в последующих исследованиях.

Таким образом, прочность, жесткость и устойчивость конструкции №1 в рассматриваемом расчетном случае обеспечиваются.

С целью проверки работоспособности СКММ, дополнительно, выполнены два расчета прочности конструкции №1 с учетом следующих параметров расчета:

1. физическое время расчета – 600 с, время нагружения – 50 с, температура конструкции – 20°C – для оценки чувствительности расчетной модели материала к скорости нагружения. Далее обозначен как «600с, 50с, 22 град»;

2. физическое время расчета – 600 с, время нагружения – 1 с, температура конструкции – 50°C – для оценки чувствительности расчетной модели материала к температуре. Далее обозначен как «600с, 1с, 50 град.»

Результаты каждого расчета сопоставляются с результатами «основного» расчета, подробнее описанного выше. С учетом того, что физическое время расчета составляет 86 400 с, для сравнения используются результаты, полученные для первых 600 с. Далее на графиках обозначен как «600с, 1с, 22 град.»

На рисунке 4.29. представлены графики изменения прогиба линии притыкания палубы и носовой стенки причала, полученные в рамках каждого расчета. Данная линия выделена на рисунке 4.30. зеленым цветом.

На рисунке 4.31 представлены графики изменения максимальных напряжений в конструкции от времени.

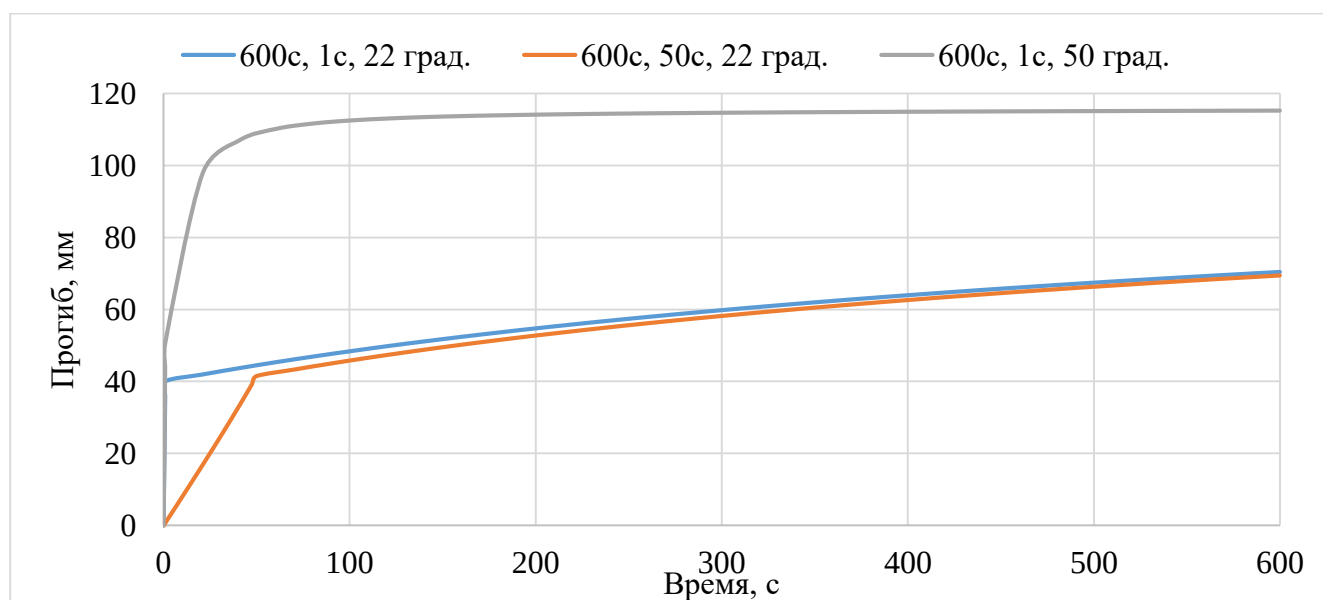


Рисунок 4.29 – Графики изменения прогиба линии притыкания палубы и носовой стенки причала от времени, полученные при различных расчетах

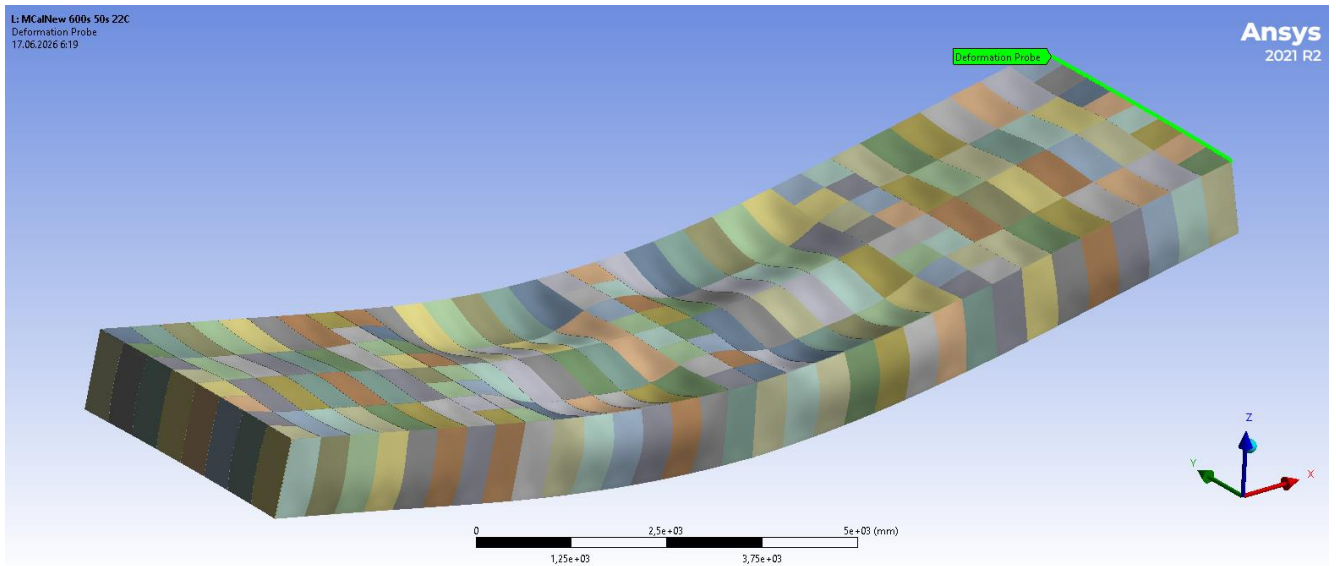


Рисунок 4.30 – Линия притыкания палубы и носовой стенки причала (выделена зеленым цветом)

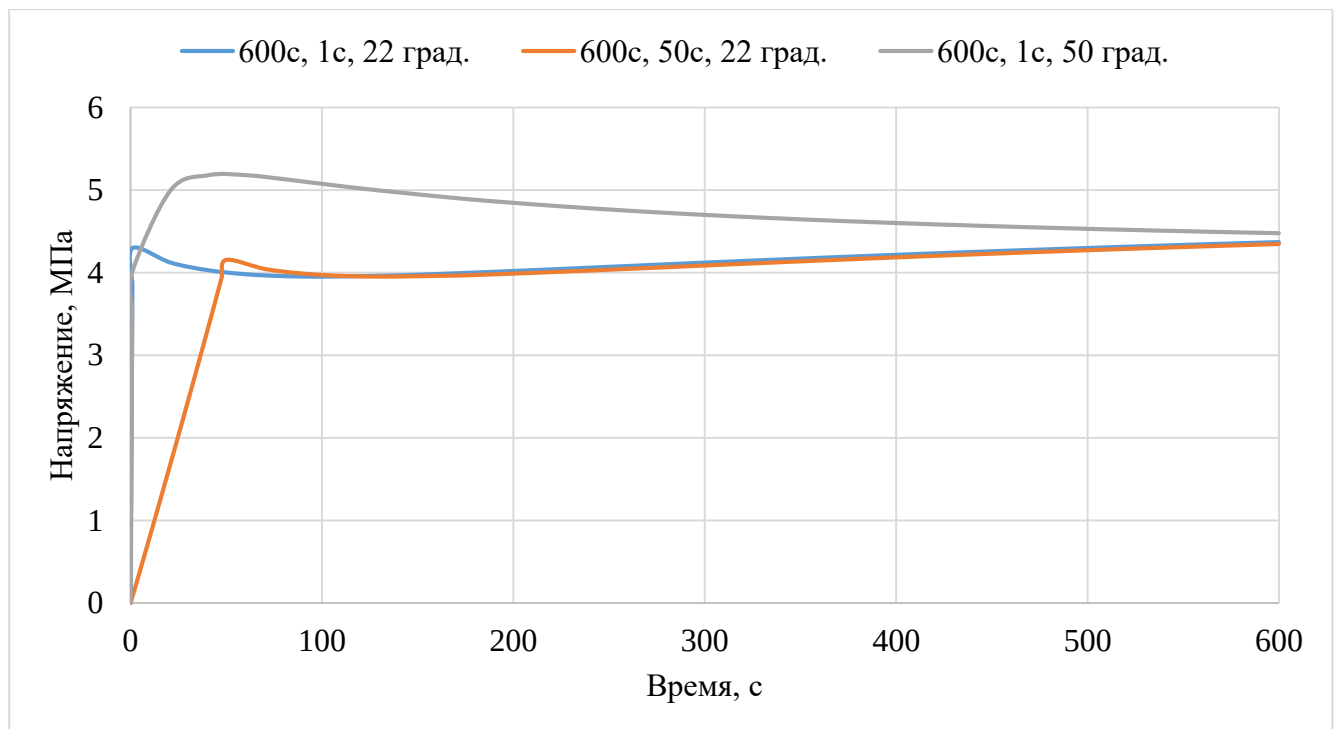


Рисунок 4.31 – Графики изменения максимальных напряжений в конструкции от времени, полученные при различных расчетах

Полученные результаты свидетельствуют о том, что СКММ отчетливо реагирует на изменение температуры конструкции. Реакция на изменение скорости нагружения практически отсутствует, что также подчеркивает необходимость проведения уточняющих работ по калибровке модели материала.

4.4.2 Проверочный расчет прочности конструкции №2

Расчет прочности конструкции №2 выполнен аналогично расчету по п. 4.4.1.

На рисунке 4.32 представлена картина вертикальных перемещений (вдоль оси Z) конструкции №2 в конечный момент времени, на рисунках 4.33 и 4.34 – картины напряженного состояния конструкции.

Как следует из представленных рисунков, наибольшие вертикальные перемещения наблюдаются на участке днищевой обшивки в районе кормовой стенки конструкции. Максимальные напряжения в конечный момент времени наблюдаются в месте пересечения бимса и вертикальной стойки продольной переборки.

На рисунке 4.35 укрупненно показана область конструкции №2 в районе максимальных напряжений, где наблюдается потеря устойчивости балок набора. Потеря устойчивости наблюдается менее, чем через 10 800 с (3 часа) с момента начала нагружения. Принимая во внимание тот факт, что расчетная модель материала на сжатие характеризуется повышенной жесткостью, в реальной конструкции потеря устойчивости могла бы наблюдаться раньше.

На рисунке 4.36 представлен график изменения прогиба (перемещения по оси Z) от времени для точки на участке днищевой обшивки, в которой наблюдается максимальное значение перемещений.

Скорость ползучести, также как и в предыдущем расчете, со временем замедляется. В качестве итогового значения скорости ползучести принимается такое, при которой изменение скорости не превышает 3%. Данное значение наблюдается в момент времени 28 944 с (отмечено на рисунке 4.34. красной точкой) и составляет 0,000130 мм/с или 0,468 мм/час. Данное значение больше нормируемого 0,324 мм/час.

С учетом изложенного, конструкция №2, в рамках рассматриваемого расчетного случая, должна быть пересмотрена и усилена.

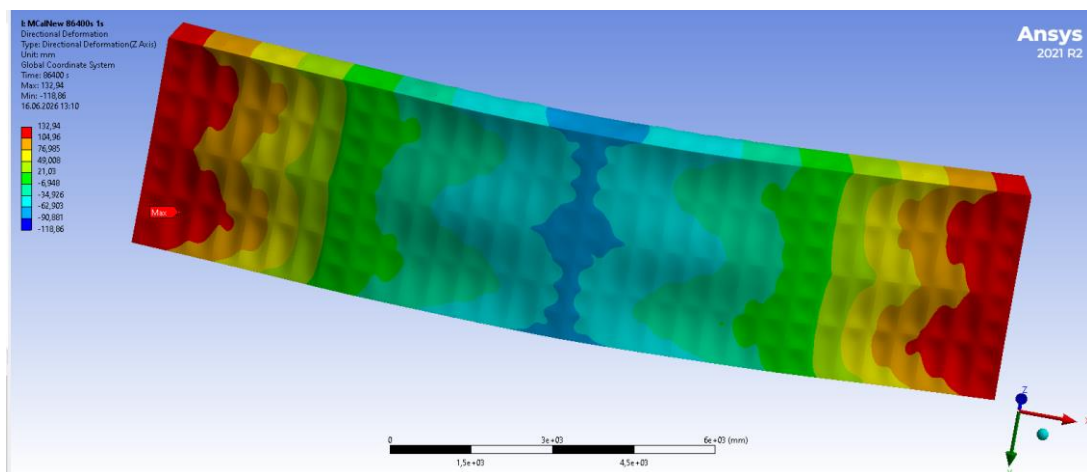


Рисунок 4.32 – Картина вертикальных перемещений в конструкции №2 в момент времени 86 400 с (вид на днище)

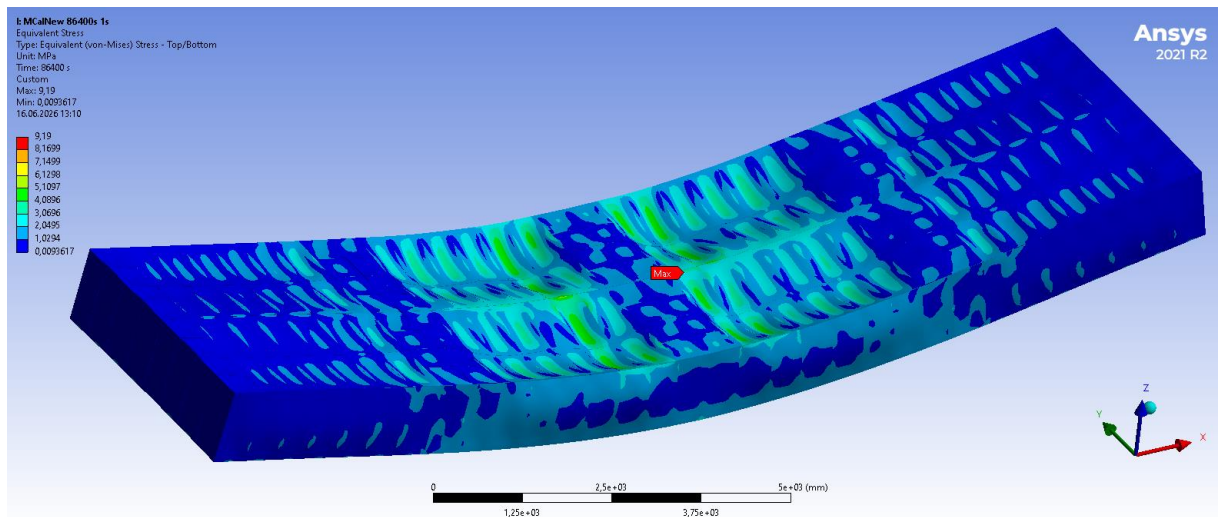


Рисунок 4.33 – Картина напряженного состояния конструкции №2 в момент времени 86 400 с (вид на палубу)

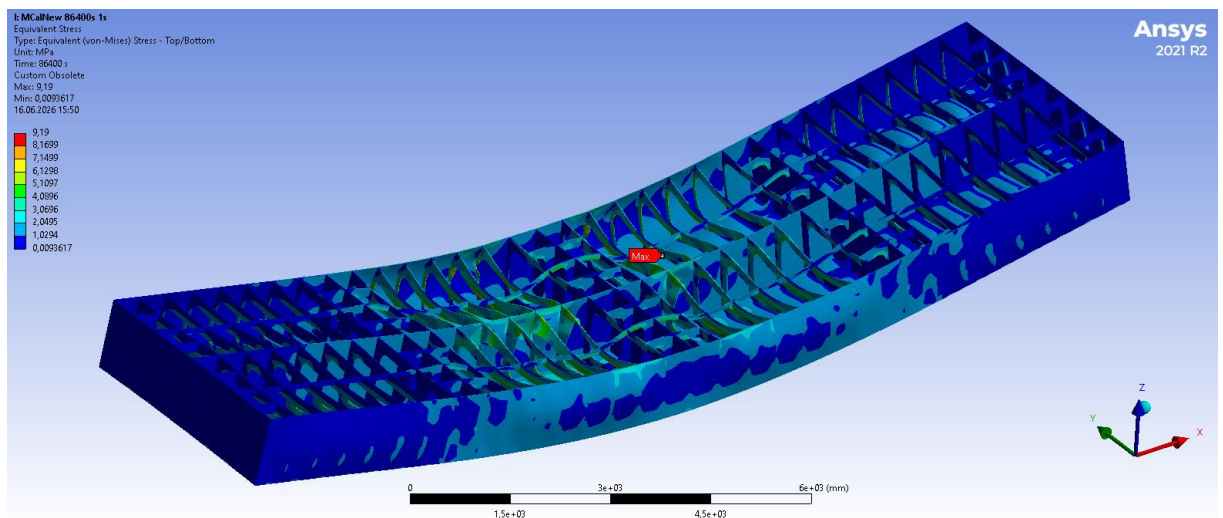


Рисунок 4.34 – Картина напряженного состояния конструкции №2 в момент времени 86 400 с (палуба не показана)

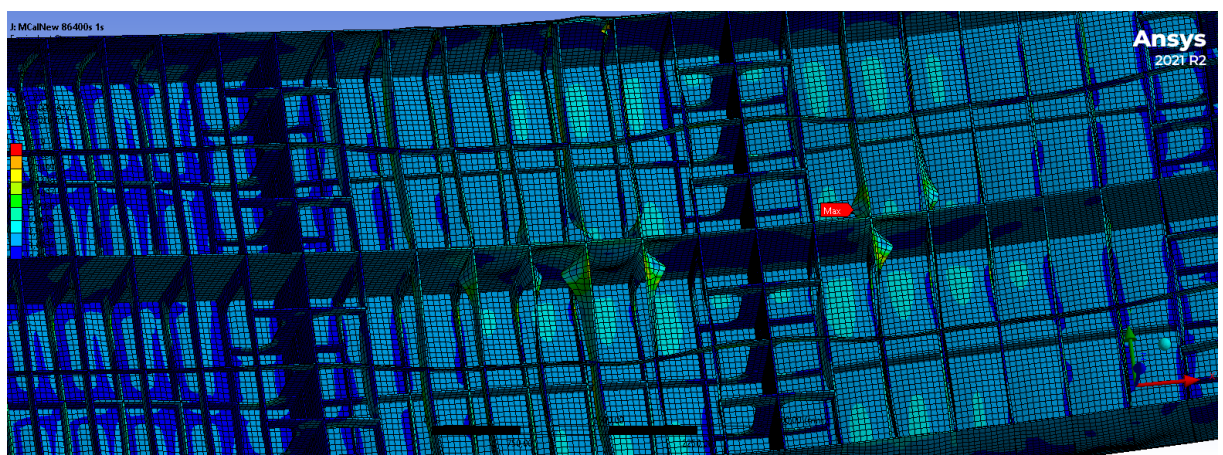


Рисунок 4.35 – Область конструкции №2 в районе максимальных напряжений

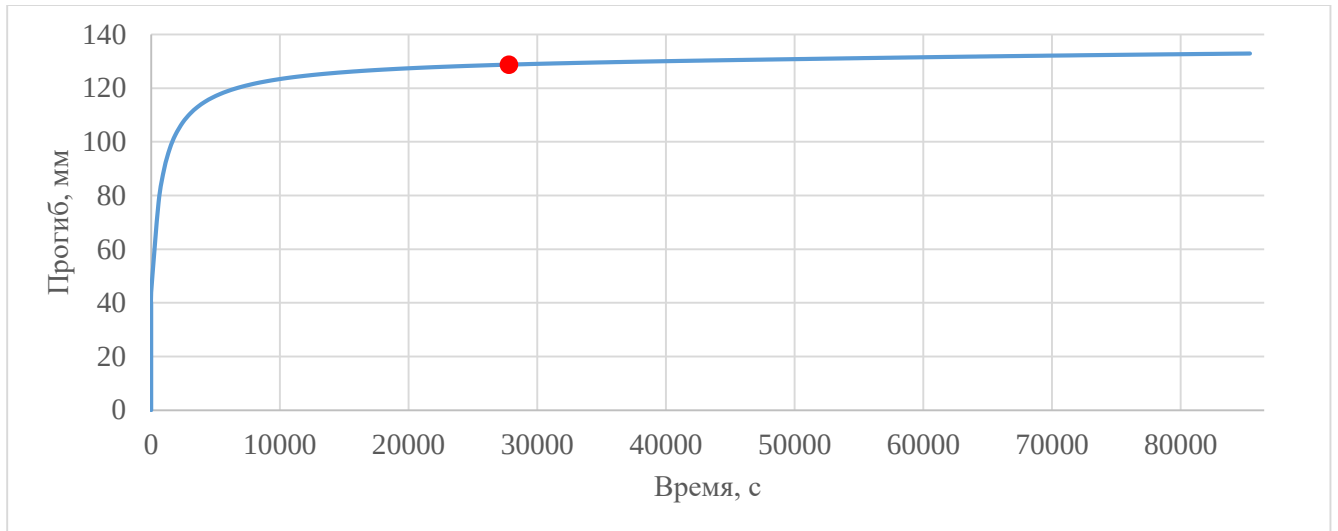


Рисунок 4.36 – График изменения прогиба от времени для точки на днищевой обшивке, в которой наблюдается максимальное значение перемещений (конструкция №2)

4.5 Выводы по главе 4

В рамках 4 главы диссертации продемонстрирован пример использования предлагаемого подхода к проектированию конструкции корпуса судна из термопластов, на примере проектирования конструкции плавучего причала из полиэтилена низкого давления и непластифицированного поливинилхлорида в заданном расчетном случае.

Конструкция из ПНД, спроектированная по предлагаемым критериям и нормам (конструкция №1) оказалась почти на 30% тяжелее конструкции, спроектированной по критериям и нормам итальянского КО (конструкция №2), что обусловлено существенным снижением КИП. Однако, на этапе выполнения проверочных расчетов прочности, состояние конструкции №2 характеризовалось потерей устойчивости и повышенной скоростью ползучести. Данный факт оказался бы неизвестным, при использовании зарубежных подходов к проектированию.

Трехсетевая модель полиэтилена низкого давления позволяет учитывать вязкоупругие свойства материала и влияние температуры конструкции, но недостаточно точно учитывает скорость нагружения конструкции, а также поведение материала на сжатие, что свидетельствует о необходимости проведения дополнительных работ в части уточнения модели материала.

Конструкция причала из НПВХ ВХЗ (конструкция №3) оказалась на 27% легче конструкции №1, при этом все критерии прочности жесткости и устойчивости оказались обеспеченными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель диссертационного исследования достигнута, задачи выполнены. **Основные научные результаты работы заключаются в следующем:**

1. предложена методика проектирования судовых корпусных конструкций из термопластов, состоящая из трех базовых этапов:

- этап I: обоснование и выбор термопласта, используемого в качестве ОКМ;
- этап II: предварительное определение размеров связей с применением КИП II этапа;
- этап III: окончательное определение размеров связей (выполнение проверочных расчетов прочности) с применением КИП III этапа.

2. сформирован перечень физико-механических характеристик термопластов, необходимый для его рассмотрения в РМРС в качестве основного конструкционного материала. Для ПНД определены минимальные пороговые значения данных характеристик;

3. разработаны корректировки к проведению испытаний неметаллических материалов на ультрафиолетовой старение для Правил РМРС. Результаты работ одобрены и внедрены в текущие Правила с 2026 г.;

4. обоснованы критерии прочности и жесткости для проектирования судовых корпусных конструкций из ПНД и НПВХ;

5. получены коэффициенты определяющих уравнений трехсетевой модели полиэтилена низкого давления необходимые для возможности проведения проверочных расчетов прочности конструкций из ПНД с учетом его реальных физико-механических свойств;

6. предложено использование НПВХ в качестве основного конструкционного материала для судов и плавучих объектов. Результаты расчетов показывают, что конструкция из НПВХ может оказаться существенно легче, чем конструкция из ПНД – на примере плавучего причала – на 27 %. При этом материал имеет более высокие ФМХ чем у ПНД, практически не склонен к ползучести и релаксации, более стоек к изменению температур и воздействию УФ излучения. Данные факты свидетельствуют о целесообразности последующего исследования применения НПВХ в качестве ОКМ для малотоннажных судов.

Выполненные в рамках диссертационного исследования работы легли в основу технического задания для деятельности Рабочей группы «Разработка требований к конструкции и прочности судов малых размерений из полиэтилена низкого давления для включения в Правила РС», что подтверждается актом о внедрении, представленном в приложении Д.

Отдельные результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс по направлениям подготовки 26.03.02 «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» (бакалавриат) и 26.04.02 «Кораблестроение, океанотехника

и системотехника объектов морской инфраструктуры» (магистратура), что что подтверждается актом внедрения в учебный процесс, представленным в приложении Д.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Для последующего развития данной темы могут быть выполнены следующие работы:

1. уточнение модели материала (учет усталости, нагрузки/разгрузки, поведения при пониженных температурах);
2. определение коэффициентов запаса на устойчивость;
3. исследование вопросов специфики конструирования отдельных узлов корпуса судна;
4. исследование НПВХ с целью возможности его использования в качестве основного конструкционного материала.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей диссертации применяются следующие сокращения и обозначения:

РМРС – Российский морской регистр судоходства
 РКО – Российское классификационное общество
 КО – Классификационное общество
 МАКО – Международная ассоциация классификационных обществ
 ПНД – полиэтилен низкого давления
 ПСД – полиэтилен среднего давления
 ПВД – полиэтилен высокого давления
 НПВХ – непластифицированный поливинилхлорид
 ККС – конструкция корпуса судна
 ФМХ – физико-механические характеристики
 ОКМ – основной конструкционный материал
 МКЭ – метод конечных элементов
 ПП – полипропилен
 ПЭ – полиэтилен
 ГИМС – Государственная инспекция по маломерным судам МЧС России
 СКК – судовые корпусные конструкции
 КИП – коэффициент использования прочности
 IRS – Indian Register of Shipping
 TL – TÜRK LOYDU
 CRS – Croatian Register of Shipping
 DNV GL – Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd
 RINA – Registro Italiano Navale
 АБС-пластик – акрилонитрилбутадиенстирол
 BV – Bureau Veritas
 ДП – диаметральной плоскость
 ОП – основная плоскость
 НДС – напряженно-деформированное состояние
 ПО – программное обеспечение
 СКММ – специальная конститутивная модель материала
 ПКМ – полимерный композиционный материал
 KR – Korean Register of Shipping
 ВХЗ – Владимирский Химический Завод
 ТК - Техноком
 ТММ – трехсетевая модель материала
 ИКО – иностранные классификационные общества
 ЛЛ – Лада-Лист
 НОЦ СМИТ «КГТУ» – научно-образовательный центр судостроения, морской инфраструктуры и техники «Калининградского государственного технического университета»
 УФ – ультрафиолет
 НИР – научно-исследовательская работа
 ГОСТ – государственный стандарт

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Market Insights Inc. Recreational Boating [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gminsights.com/industry-reports/recreational-boating/73> (дата обращения: 18.06.2026).
2. Market Research Future. Small Boats Market Size, Growth, Trends Report 2035 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/small-boats-market-28035> (дата обращения: 18.06.2026).
3. Firmanda, T., Anggara, S., Hariadi, M. and Prakasa, A. HDPE as a New Alternative Material for Small Vessel Boat Strength. In Proceedings of the 5th International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science (iCAST-ES 2022), pages 473-477. DOI: 10.5220/0011814700003575
4. Overview of materials for High Density Polyethylene (HDPE), Extruded [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=482765fad3b443169ec28fb6f9606660&cck=1> (дата обращения: 18.06.2026).
5. Overview of materials for PVC, Extruded [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bb6e739c553d4a34b199f0185e92f6f7> (дата обращения: 18.06.2026).
6. Chrismianto, D & Manik, P & Rindo, Good. (2018). Study comparative of stability performance between PVC fishing boat and wooden traditional fishing boat. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 403. 012002. 10.1088/1757-899X/403/1/012002.
7. Chrismianto, D. & Manik, P. & Rindo, Good & Firdhaus, Ahmad. (2019). Design comparative of PVC fishing boat with variation of ship hullform and fishing gear type. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 10. 1934-1941.
8. Chrismianto, Deddy & Manik, Parlindungan & Rindo, Good & Pambudi, Ilham. (2020). Floodable Length Analysis and Addition of Passive U-Tube Tanks to Reduce Rolling on 15 GT Fishing Boat of PVC's Pipes. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 9. 289-295. 10.35940/ijitee.C7946.019320.
9. Amiruddin, Wilma & Yudo, Hartono. (2018). Technical Analysis of PVC Pipe Materials for Hull Vessel. 205-208. 10.5220/0009341902050208.
10. Королев, С. А. Особенности оценки прочности корпусов судов из полиэтилена / С. А. Королев, А. Г. Назаров // Новые технологии в судостроении НТС-2024 : Сборник трудов III отраслевой научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 21–22 ноября 2024 года. –

Санкт-Петербург: АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 2024. – С. 106-114. – EDN JGMVZU.

11. Гусев, В. В. Производство полиэтиленовых лодок в ракурсе решения экономико-экологических задач / В. В. Гусев // Индустриальная экономика. – 2024. – № S2. – С. 122-129. – DOI 10.47576/2949-1886.2024.13.98.018. – EDN VOFLHT.]

12. Гусев, В. В. К вопросу об использовании инновационных способов сварки полиэтиленовых лодок и их влиянии на судостроение и экономический потенциал / В. В. Гусев // Экономика и предпринимательство. – 2024. – № 12(173). – С. 1322-1329. – DOI 10.34925/EIP.2024.173.12.239. – EDN GRBARR.

13. Патент № 2790245 С1 Российская Федерация, МПК В63В 5/24, В29С 65/40. способ сварки борта и шпангоута лодки из полиэтилена: № 2022116248 : заявл. 16.06.2022: опубл. 15.02.2023 / В. В. Гусев. – EDN VEABGT.

14. Kafalı, Mustafa. (2023). A Research on Design and Production of HDPE Boat Structural Elements. Conference: 4th International Naval Architecture and Maritime Symposium (INT-NAM 2023)

15. Cho, Seok-Swoo & Kwak, Won-Min & Ham, Bum-Sik & Jo, Young-Chul. (2013). A Study on Structural Strength Assessment of Polyethylene Boat. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. 14. 10.5762/KAIS.2013.14.3.1045.

16. Park, Chan-Kyun & Kim, Min-Gun & Cho, Seok-Swoo. (2011). Study on Structural Analysis and Manufacturing of Polyethylene Canoes. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A. 35. 10.3795/KSME-A.2011.35.3.309.

17. Cho, Seok-Swoo. (2015). Structural Design of Polyethylene Boat Hull by using Longitudinal Bending Strength Test Method. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. 16. 8447-8454. 10.5762/KAIS.2015.16.12.8447.

18. Cho, Seok-Swoo. (2013). A Study on Hull Form Development of Polyethylene Boat. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. 14. 10.5762/KAIS.2013.14.10.4726.

19. Riong, L.S., Kang, G., & Cho, S. (2017). Evaluation of Structural Safety of Polyethylene Boats by Drop Test Method. Journal of the Korea Academia Industrial Cooperation Society, 18, 531-542.

20. Cho, S. (2013). An Experimental Estimation of Thermal Fatigue at Polyethylene Boat. The Korea Academia-Industrial cooperation Society, 14, 2559-2565.

21. Cho, Seok. (2012). Study of Structural Design of Polyethylene Pleasure Boat. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A. 36. 10.3795/KSME-A.2012.36.12.1551.

22. Oh, Jeong-Seok & Cho, Seok-Swoo. (2014). A Study on Estimation of Fatigue Performance of Polyethylene Boat. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. 15. 10.5762/KAIS.2014.15.1.47.
23. B, Siswandi & Aryawan, Wasis. (2017). High Density Polyethylene (HDPE) Vessel of Pompong as a Fishing Vessel for Bengkalis Fisherman. IPTEK Journal of Proceedings Series. 108. 10.12962/j23546026.y2017i2.2306.
24. Setyawan, Dony & Sulisetyono, Aries & Aryawan, Wasis & Chandra Ariesta, Rizky. (2022). Finite Element Analysis for Structural Strength of High-Density Polyethylene Material on Midship Boat Structure. 93-98. 10.1109/OETIC57156.2022.10176242.
25. Adifatama, Alifiansyah & Setyawan, Dony & Chandra Ariesta, Rizky. (2024). Studi Pengaruh Penguatan Pada Struktur Lambung Berbahan HDPE terhadap Deformasi Kapal Menggunakan Metode Elemen Hingga. Jurnal Teknik ITS. 13. 10.12962/j23373539.v13i3.152709.
26. Saputra, Noverdo & Martana, Budhi & Noorohmah, Fahrudin & Rizal, Reda. (2021). Study on the strength of a fishing boat made from plastic recycles. E3S Web of Conferences. 328. 07002. 10.1051/e3sconf/202132807002.
27. Saputra, Noverdo & Iswadi, Nia & Reda, Radwan & Bambang, S & Muayyad, P. (2021). Study of Utilization Plastic Waste as Basic Material for Boat Manufacturing Using Eco-green Design Concept.
28. Rules for the classification of vessels of less than 24 meters in length. Croatian Register of Shipping, July, 2021.
29. Craft — DNVGL-ST-0342. Edition July 2016 // DNV GL, 2016. – 135 с.
30. Guidelines on Hull Structure of Thermoplastic Vessels (Provisional). – Indian Register of Shipping, 2021. – 14 с.
31. Tentative Rules for Polyethylene Crafts. – TÜRK LOYDU, 2014. – 14 с.
32. Hull in Composite, Plywood and High Density Polyethylene Materials – NR546. – BUREAU VERITAS, 2022. – 134 p.
33. Rules for the Classification of Ships with Plastic, Aluminium Alloy or Wooden Hulls. – RINA, 2023. – 168 с.
34. Пособие по проектированию технологических трубопроводов из пластмассовых труб (к СН 550-82) / С. В. Ехлаков, Ю. С. Давыдов, Г. И. Шапиро, Е. С. Гольянова ; Науч.-произв. объединение "Пластик" Минхимпрома. – Москва: Стройиздат, 1984. – 139 с.
35. Рекомендации по расчету и проектированию трубопроводов из термопластов / ЦНИИЭП инженерного оборудования. НПО «Пластик». – М.: Стройиздат, 1985. – 136 с.
36. NCHRP Report 429. HDPE Pipe: Recommended Material Specifications and Design Requirements. Transportation Research Board National Research Council

37. ISO 12215-5:2019. Суда малые. Конструкция корпуса и элементы набора корпуса. Часть 5: Расчетные давления для однокорпусников, расчетные напряжения, определение элементов набора корпуса = Small craft — Hull construction and scantlings — Part 5: Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination. – Введ. 2019-05-13.

38. Воронин М.С. Моделирование вязко-упругого поведения полимеров в рамках подхода Максвелла-Годунова – диссертация на соискание степени к.т.н.. Новосибирск, 2017

39. Kuhl, Andre & Muñoz-Rojas, Pablo & JR, M. & Carniel, Thiago. (2013). Modeling Nonlinear Viscoelastoplastic Behavior of High Density Polyethylene (HDPE) Using Particle Swarm Optimization (PSO).

40. Wagner, Manfred & Bastian, H. & Ehrecke, Philipp & Kraft, Markus & Hachmann, Peter & Meissner, J.. (1998). Nonlinear viscoelastic characterization of a linear polyethylene (HDPE) melt in rotational and irrotational flows. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 79. 283-296. 10.1016/S0377-0257(98)00112-8.

41. Dusunceli N., Colak O.U. High density polyethylene (HDPE): Experiments and modeling // *Mechanics of Time-Dependent Materials*. – 2006. – Vol. 10, No. 4. – P. 331-345

42. Hameed M.G., Kadhim B.J., Jura J., Mehdi A.H., Al-Mutairi N.H. Strain rate effect on the mechanical properties of thermoplastic polyolefin // *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*. – 2023. – Vol. 12. – P. 209-216. – DOI: 10.17512/bozpe.2023.12.23

43. Merah N. Variation of Mechanical Properties of HDPE Pipe Material with Temperature / N. Merah, F. Saghir, Z. Khan, A. Bazoune // *8th International Conference On Advances In Materials And Processing Technologies*. – 2005.

44. Chaudhry A.U. Thermally enhanced pristine polyolefins: fundamentals, progress and prospective / A.U. Chaudhry, A. Mabrouk, A. Abdala // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2020. – Vol. 21, No. 1. – P. 737-766. – DOI: 10.1080/14686996.2020.1820306

45. Al-Maqdasi Z. Time-dependent properties of high-density polyethylene with wood/graphene nanoplatelets reinforcement / Z. Al-Maqdasi, L. Pupure, N. Emami, R. Joffe // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2021 P. 1-15. – DOI: 10.1002/app.50783

46. Awad A.H. Mechanical and Physical Properties of PP and HDPE / A.H. Awad, R. ElGamsy, A. Abd El Wahab, M.H. Abdellatif // *Engineering Science*. – 2019. – Vol. 4, No. 2. – P. 34-42. – DOI: 10.11648/j.es.20190402.12.

47. Справочник по строительной механике корабля. Том 1, под общей редакцией академика Ю. А. Шиманского. – Л.: Судпромгиз, 1958, с. 627

48. Справочник по строительной механике корабля. Том 2, под общей редакцией академика Ю. А. Шиманского. – Л.: Судпромгиз, 1958, с. 528

49. Правила классификации и освидетельствования плавучих объектов для внутренних водных путей Российской Федерации. Российский Морской Регистр Судоходства. НД № 020201-029. Санкт-Петербург, 2026 г. 88 с.
50. Писаренко Г.С., Справочник по сопротивлению материалов, Киев, Наукова думка, 1988 г., 736 стр
51. Сопротивление материалов, Н. М. Беляев, Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976 г., стр. 608.
52. Правила классификации и постройки судов. Часть XIII «Материалы». Российский Морской Регистр Судоходства. НД № 020101-174. Санкт-Петербург, 2026 г. 369 с.
53. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII «Материалы». Российское Классификационное Общество. Москва, 2020 г. 280 с.
54. Правила классификации и постройки судов. Российское Классификационное Общество. Москва, 2019 г. 1727 с.
55. Правила классификации и постройки судов. Часть XVI «Конструкция и прочность судов из полимерных композиционных материалов». Российский Морской Регистр Судоходства. НД № 020101-174. Санкт-Петербург, 2025 г. 168 с.
56. Guidelines for Ships of Polyethylene. Korean Register, 2023
57. Pan, Huanyu & Devasahayam, Sheila & Bandyopadhyay, Sri. (2017). Study of microstructure and fracture properties of blunt notched and sharp cracked high density polyethylene specimens. Scientific Reports. 7. 6096. 10.1038/s41598-017-03884-6.
58. Kwon, Hyung-Jo & Jar, P.-Y. (2008). On the application of FEM to deformation of high-density polyethylene. International Journal of Solids and Structures – INT J SOLIDS STRUCT. 45. 3521-3543. 10.1016/j.ijsolstr.2008.02.013.
59. AGRU Sure Grip HDPE Liner. 2017. 5p.
60. Tough, Maintenance-Free HDPE and Polypropylene Sheet Products. Simona. 4 p.
61. Metzoplast HDPE/MF. Epsotech. 1p.
62. Трубы для судостроения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://innoformula.ru/prim/shipbuilding/> (дата обращения: 18.06.2026).
63. Produkt details. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.simona.de/index.php?id=3948&L=1&product_code=010026295&cHash=5f2bb0b4f8956f778ae9c7c375a7532 (дата обращения: 18.06.2026).
64. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II «Корпус». Российский Морской Регистр Судоходства. НД № 020101-174. Санкт-Петербург, 2026 г. 330 с.
65. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.

66. Combining Detailed Experiments, PolyUMod, Kornucopia, and Abaqus to Create Accurate FE Scratch Simulations. Ted Diehl, Jorgen S. Bergstrom, Xiaohu Liu, Li Lin, Ye Zhu, John J. Podhiny, Richard T. Chou, and Jeffrey A. Chambers. 2013. SIMULIA Community Conference
67. Arruda, E. M. and Boyce, M. C., “A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials”, J. Mech. Phys. Solids. 41, 2, pp. 389–412, 1993.
68. An Advanced Thermomechanical Constitutive Model for UHMWPE. J. S. Bergstrom, J.E. Bischoff. International Journal Of Structural Changes In Solids – Mechanics and Applications Volume 2, Number 1, April 2010, p. 31-39
69. A Constitutive Model For Thermoplastics With Some Applications. Arild Holm Clausen, Mario Polanco-Loria, Torodd Berstad and Odd Sture Hopperstad. European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg – May 2011
70. Белкин А.Е. Математическая модель вязкоупругого поведения полиуретана при сжатии с умеренно высокими скоростями деформирования/А.Е. Белкин, И.З. Даштиев, В.К. Семенов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2014. – № 6. – С. 44-58
71. Rules for the classification of inland navigation vessels-Part B – Hull design and Construction. Bureau Veritas. NR217. 2025. P. 324.
72. Impact on HDPE and PVC plates – Experimental tests and numerical simulations / R.T. Moura, A.H. Clausen, E. Fagerholt, M. Alves, M.Langseth // International Journal of Impact Engineering. 2010. № 37. P. 580-598. DOI: 10.1016/J.IJIMPENG.2009.12.004.
73. Static and Dynamic Properties of Semi-Crystalline Polyethylene / M. Xu, G. Huang, S. Feng, G.J. McShane, W.J. Stronge //Polymers. 2016. №8(4): 77. 14 p. DOI:10.3390/polym8040077
74. Anisotropic mechanical behavior of semi-crystalline polymers: Characterization and modeling of non-monotonic loading including damage / K. Mrabet, O. Terfas, C.P. Laurent, R. Rahouadj // Journal of Applied Polymer Science. 2016. № 134(7). 11 p. DOI:10.1002/app.44468
75. ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение: межгосударственный стандарт. – М. : Стандартинформ, 2018. – 26 с.
76. ГОСТ 4648-2014. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. – М. : Стандартинформ, 2014. – 24 с.
77. ГОСТ 4651-2014. Пластмассы. Метод испытания на сжатие. – М. : Стандартинформ, 2014. – 23 с
78. Modeling of Stress Relaxation Behavior in HDPE and PP Using Fractional Derivatives / K. L. Segura-Méndez, J. G. Puente-Córdova, F. Y. Rentería-Baltíérrez, J. F. Luna-Martínez , N. Mohamed-Noriega // Polymers (Basel). 2025 № 17(4):453. 23 p. DOI: 10.3390/polym17040453.

79. Стеценко Н. С., Хохлов А.В. Идентификация нелинейного определяющего соотношения Работнова по данным испытаний полиэтилена и полипропилена на ползучесть // Труды МАИ. 2018. №103. 23 с.
80. Soares A. K., Covas D. I. C., Reis L. F. R. Analysis of PVC Pipe-Wall Viscoelasticity during Water Hammer // Journal of Hydraulic Engineering. 2008. № 134(9). P. 1389 – 1994. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000148
81. J. Calaf-Chica, P. M. B. Diez, M. P. Calzada. Viscoelasticity and the Small Punch Creep Recovery Test: Numerical Analysis and Experimental Tests on the Applicability for Polyvinyl Chloride (PVC // Mechanics of Materials. 2021. № 161. 11 p. DOI: 10.1016/J.MECHMAT.2021.104016
82. ГОСТ 18197-2014. Пластмассы. Метод определения ползучести при растяжении. – М. : Стандартиформ, 2016. – 20 с.
83. Amjadi M., Fatemi A. Tensile Behavior of High-Density Polyethylene Including the Effects of Processing Technique, Thickness, Temperature, and Strain Rate // Polymers. – 2020. – Vol. 12, No. 9. – P. 1857. – DOI: 10.3390/polym12091857.
84. Souza J.F.B. Temperature effect on the tensile properties of unplasticized polyvinyl chloride / J.F.B. Souza, F.C. Amorim, H.S. Costa Mattos, J.M.L. Reis // SPE Polymers. – 2022. – Vol. 3, No. 2. – P. 99-104. – DOI: 10.1002/pls2.10067.
85. Durosinmi S.A. Mechanical and Structural Changes of PVC When Subjected to Heat [Электронный ресурс]: bachelor's thesis / Arcada University of Applied Sciences, Degree Programme in Plastics Technology. – Helsinki, 2015. – 119 p. – URL: <https://www.theseus.fi/handle/10024/96371> (дата обращения: 18.06.2026).
86. Salam M.S. The Effect of Root Face Height and Width of Hot-Gas Welding Plate Heater on Tensile Strength of HDPE Sheet / M.S. Salam, [другой автор] // Evrimata: Journal of Mechanical Engineering. – 2025. – DOI: 10.70822/evrmata.vi.13.
87. Сварка полимерных материалов : справочник / К. И. Зайцев, Л. Н. Мацюк, А. В. Богдашевский, С. С. Волков, Г. В. Комаров ; под общ. ред. К. И. Зайцева, Л. Н. Мацюк. – Москва : Машиностроение, 1988. – 310 с
88. Mao Q. Investigation of Tensile Creep Behavior for High-Density Polyethylene (HDPE) via Experiments and Mathematical Model / Q. Mao, B. Su, R. Ma, Z. Li // Materials. – 2021. – Vol. 14, No. 20. – P. 6188. – DOI: 10.3390/ma14206188.
89. Wang L. Creep Failure Characteristics and Mathematical Modeling of High-Density Polyethylene Geomembranes under High Stress Levels / L. Wang, W. Cen, E. Bauer, J. Wei, Z. Wen, J. Yan // Polymers. – 2024. – Vol. 16, No. 14. – P. 2019. – DOI: 10.3390/polym16142019.
90. Drozdov A.D. Lifetime Predictions for High-Density Polyethylene under Creep: Experiments and Modeling / A.D. Drozdov, R.H. Jermini, J. deC. Christiansen // Polymers. – 2023. – Vol. 15, No. 2. – P. 334. – DOI: 10.3390/polym15020334.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Свидетельства о поверке испытательного оборудования (справочное)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ "ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ" (ФБУ "Калининградский ЦСМ")

RA.RU.311465 / ИНН 3906030024 КПП 390601001

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ № С-БС/20-05-2024/339943083

Действительно до: 19 мая 2025 г.

Средство измерений	Машины испытательные универсальные; РЭМ; РЭМ-10-А-1-2; 76470-19 наименование и обозначения типа, модификация (при наличии) средства измерений, регистрационный номер в
	Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа
заводской номер	210272MT заводской (серийный) номер или буквенно-цифровое обозначение
в составе	-
поверено	в полном объеме наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений
	или которые исключены из поверки
в соответствии с	МП-ТМС-018/19 наименование или обозначения документа, на основании которого выполнена поверка
с применением эталонов:	32778-06 Динамометры электронные на растяжение, сжатие и универсальные Нет данных регистрационные номера эталонов и (или) наименования и обозначения типов стандартных образцов и (или)
	1239 2011 Эталон 2 разряда ГПС для средств измерения силы (утверждена приказом Росстандарта от 22 октября средств измерения, заводские номера, обязательные требования к эталонам
	2019 г. №2498); 32778-06 Динамометры электронные на растяжение, сжатие и универсальные Нет данных 460 2009 Эталон 2 разряда ГПС для средств измерения силы (утверждена приказом Росстандарта от 22 октября 2019 г.
	№2498) при следующих значениях влияющих факторов:
	температура окружающего воздуха 19,1 °С, атмосферное давление 101,2 кПа, перечень влияющих факторов, при которых проводилась поверка, с указанием их значений
	относительная влажность 62,3 %
	и на основании результатов периодической поверки признано пригодным к применению.
Постоянный адрес записи сведений о результатах поверки в ФИФ:	https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/results/339943083
Номер записи сведений о результатах поверки в ФИФ ОЕИ:	339943083
Поверитель	Колосов М. К. фамилия, инициалы
Знак поверки:	

Начальник отдела должность руководителя или другого уполномоченного лица			Колосов М. К. фамилия, инициалы
Дата поверки:	20.05.2024		
 РОССТАНДАРТ Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии			

Рисунок А.1 – Свидетельство о поверке испытательной машины РЭМ-10-А-1-2 на 2024-2025 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ "ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ" (ФБУ "Калининградский ЦСМ")

RA.RU.311465 / ИНН 3906030024 КПП 390601001

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ № С-БС/14-05-2025/437798636

Действительно до: 13 мая 2026 г.

Средство измерений	Машины испытательные универсальные; РЭМ; РЭМ-10-А-1-2; 76470-19 наименование и обозначение типа, модификация (при наличии) средства измерений, регистрационный номер в
Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа	
заводской номер	210272MT заводской (серийный) номер или буквенно-цифровое обозначение
в составе	-
поверено	в полном объеме наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений
или которые исключены из поверки	
в соответствии с	МП-ТМС-018/19 наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка
с применением эталонов:	32778-06 Динамометры электронные на растяжение, сжатие и универсальные Нет данных регистрационные номера эталонов и (или) наименования и обозначения типов стандартных образцов и (или)
1239 2011 Эталон 2 разряда ГПС для средств измерения силы (утверждена Приказом Росстандарта от 22 октября средств измерений, заводские номера, обязательные требования к эталонам	
2019 г. №2498); 32778-06 Динамометры электронные на растяжение, сжатие и универсальные Нет данных 460 2009 Эталон 2 разряда ГПС для средств измерения силы (утверждена приказом Росстандарта от 22 октября 2019 г. №2498)	
при следующих значениях влияющих факторов:	температура окружающего воздуха 19,2 °С, атмосферное давление 101,1 кПа, перечень влияющих факторов, при которых проводилась поверка, с указанием их значений
относительная влажность 61,2 %	
и на основании результатов периодической поверки признано пригодным к применению.	
Постоянный адрес записи сведений о результатах поверки в ФИФ:	https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/results/437798636
Номер записи сведений о результатах поверки в ФИФ ОЕИ:	437798636
Поверитель	Колосов М. К. фамилия, инициалы
Знак поверки:	

Начальник отдела должность руководителя или другого уполномоченного лица			Колосов М. К. фамилия, инициалы
Дата поверки:	14.05.2025		
			

Рисунок А.2 – Свидетельство о поверке испытательной машины РЭМ-10-А-1-2 на 2025-2026 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ "ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ" (ФБУ "Калининградский ЦСМ")

RA.RU.311465 / ИНН 3906030024 КПП 390601001

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ № С-БС/20-05-2024/339943086

Действительно до: 19 мая 2025 г.

Средство измерений	Машины испытательные универсальные; РЭМ; РЭМ-50-А-1-2; 76470-19
	наименование и обозначение типа, модификация (при наличии) средства измерений, регистрационный номер в
	Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа
заводской номер	210273MT
	заводской (серийный) номер или буквенно-цифровое обозначение
в составе	-
поверено	в полном объеме
	наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений
	или которые исключены из поверки
в соответствии с	МП-ТМС-018/19
	наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка
с применением эталонов:	32778-06 Динамометры электронные на растяжение, сжатие и универсальные Нет данных
	регистрационные номера эталонов и (или) наименования и обозначения типов стандартных образцов и (или)
	460 2009 Эталон 2 разряда ГПС для средств измерения силы (утверждена приказом Росстандарта от 22 октября
	средств измерений, заводские номера, обязательные требования к эталонам
	2019 г. №2498); 32778-06 Динамометры электронные на растяжение, сжатие и универсальные Нет данных 461 2009
	Эталон 2 разряда ГПС для средств измерения силы (утверждена приказом Росстандарта от 22 октября 2019 г.
	№2498)
при следующих	
значениях влияющих	
факторов:	температура окружающего воздуха 19,1 °С, атмосферное давление 101,2 кПа,
	перечень влияющих факторов, при которых проводилась поверка, с указанием их значений
	относительная влажность 62,3 %
	и на основании результатов периодической поверки признано пригодным к применению.
Постоянный адрес	
записи сведений о	
результатах поверки в	
ФИФ:	https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/results/339943086
Номер записи сведений о	
результатах поверки в	
ФИФ ОЕИ:	339943086
Поверитель	Колосов М. К.
	фамилия, инициалы
Знак поверки:	

Начальник отдела			Колосов М. К.
должность руководителя или	подпись		фамилия, инициалы
другого уполномоченного лица			
Дата поверки:	20.05.2024		

Рисунок А.3 – Свидетельство о поверке испытательной машины РЭМ-50-А-1-2 на 2024-2025 г

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ "ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ" (ФБУ "Калининградский ЦСМ")

RA.RU.311465 / ИНН 3906030024 КПП 390601001

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ № С-БС/14-05-2025/437798635

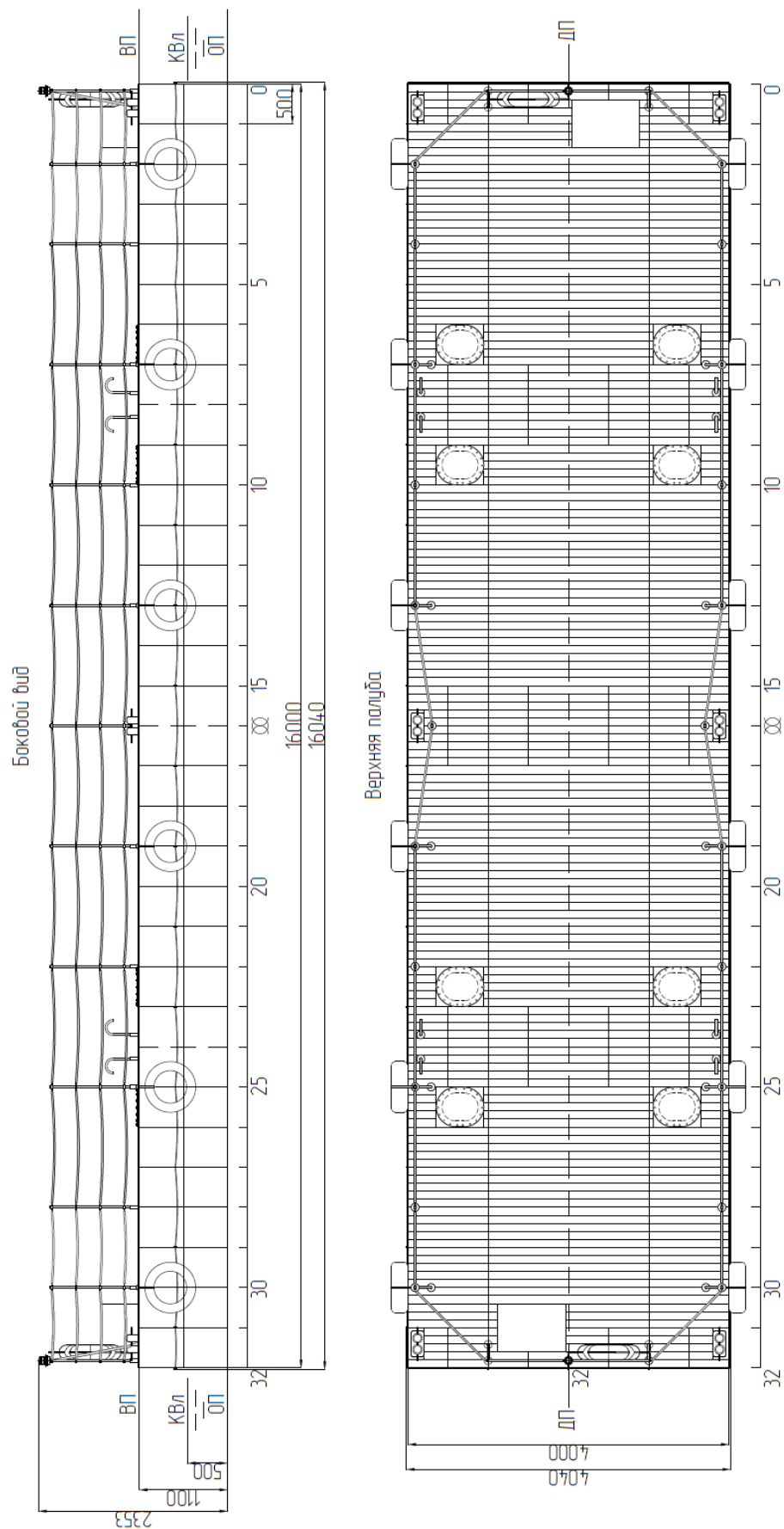
Действительно до: 13 мая 2026 г.

Средство измерений	Машины испытательные универсальные; РЭМ; РЭМ-50-А-1-2; 76470-19 наименование и обозначение типа, модификация (при наличии) средства измерений, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа
заводской номер	210273MT заводской (серийный) номер или буквенно-цифровое обозначение
в составе	-
поверено	в полном объеме наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений
в соответствии с	МП-ТМС-018/19 или которые исключены из поверки
с применением эталонов:	32778-06 Динамометры электронные на растяжение, сжатие и универсальные Нет данных регистрационные номера эталонов и (или) наименования и обозначения типов стандартных образцов и (или) средств измерений, заводские номера, обязательные требования и эталонам
	460 2009 Эталон 2 разряда ГПС для средств измерения силы (утверждена приказом Росстандарта от 22 октября 2019 г. №2498); 32778-06 Динамометры электронные на растяжение, сжатие и универсальные Нет данных 461 2009 Эталон 2 разряда ГПС для средств измерения силы (утверждена приказом Росстандарта от 22 октября 2019 г. №2498)
при следующих значениях влияющих факторов:	температура окружающего воздуха 19,2 °С, атмосферное давление 101,1 кПа, перечень влияющих факторов, при которых проводилась поверка, с указанием их значений
	относительная влажность 61,2 %
	и на основании результатов периодической поверки признано пригодным к применению.
Постоянный адрес записи сведений о результатах поверки в ФИФ:	https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/results/437798635
Номер записи сведений о результатах поверки в ФИФ ОЕИ:	437798635
Поверитель	Колосов М. К. фамилия, инициалы
Знак поверки:	

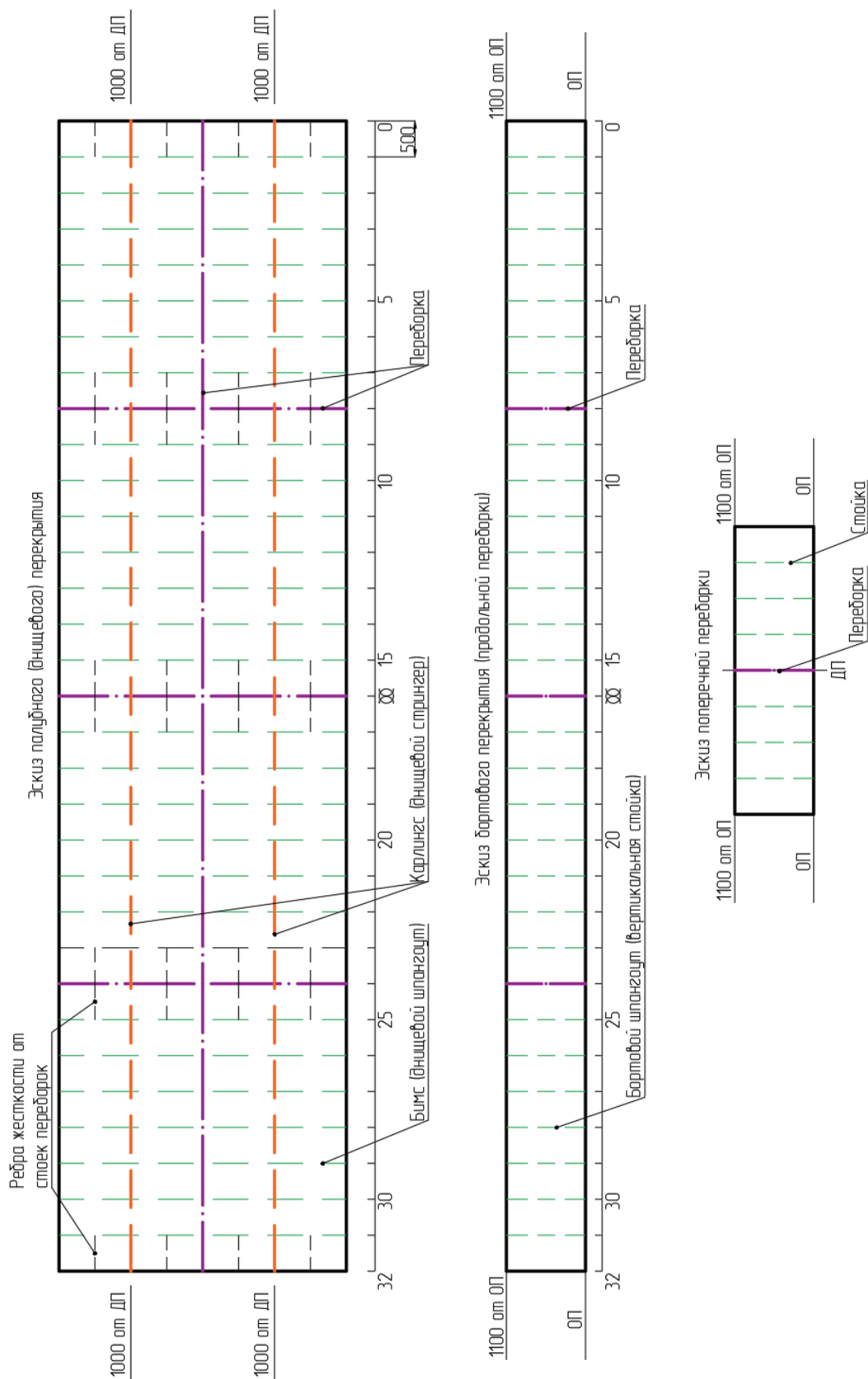
Начальник отдела должность руководителя или другого уполномоченного лица Дата поверки: 14.05.2025	 подпись	 Колосов М. К. фамилия, инициалы
		

Рисунок А.4 – Свидетельство о поверке испытательной машины РЭМ-50-А-1-2 на 2025-2026 г

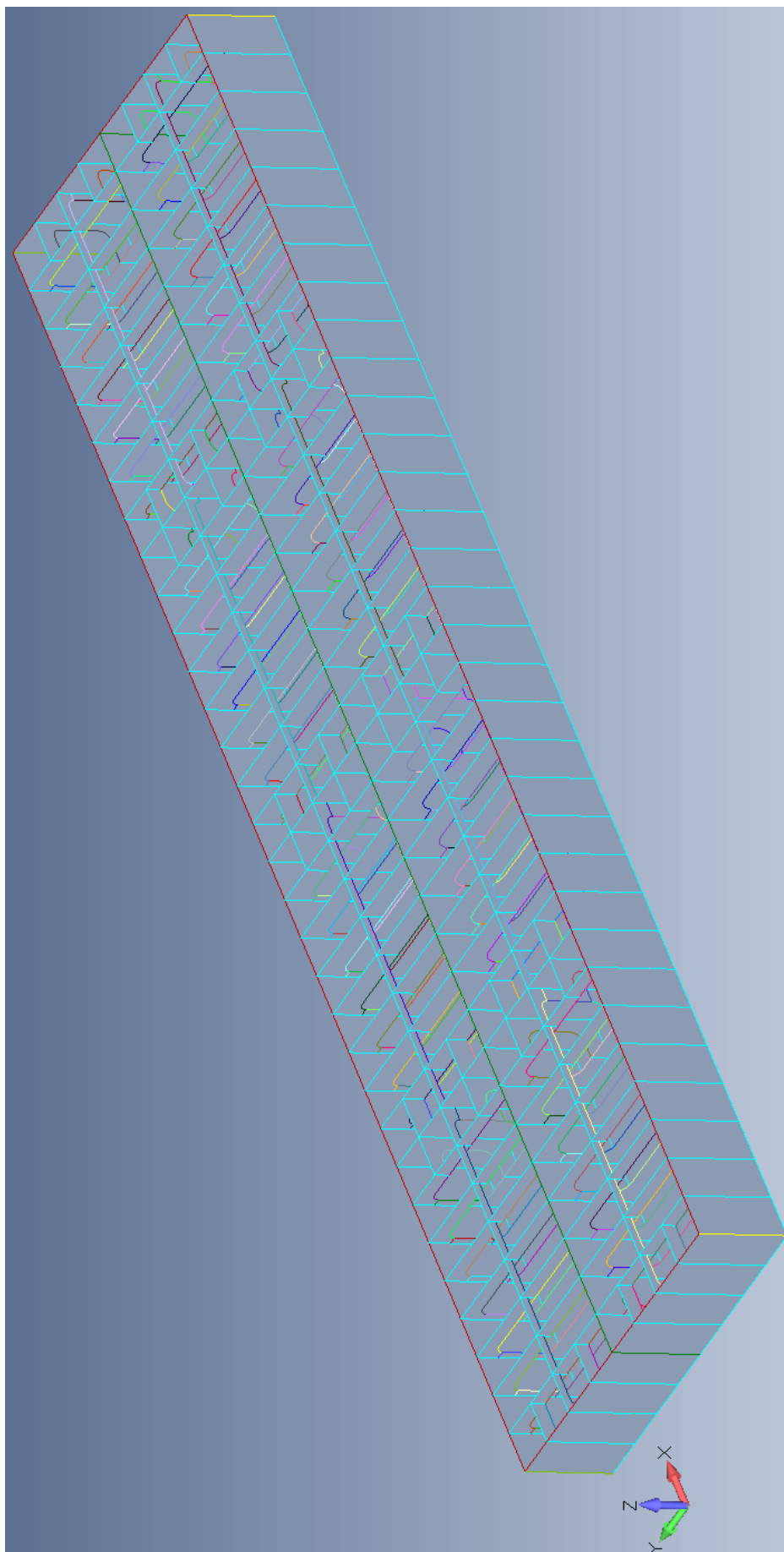
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Чертеж общего расположения плавучего причала
(обязательное)



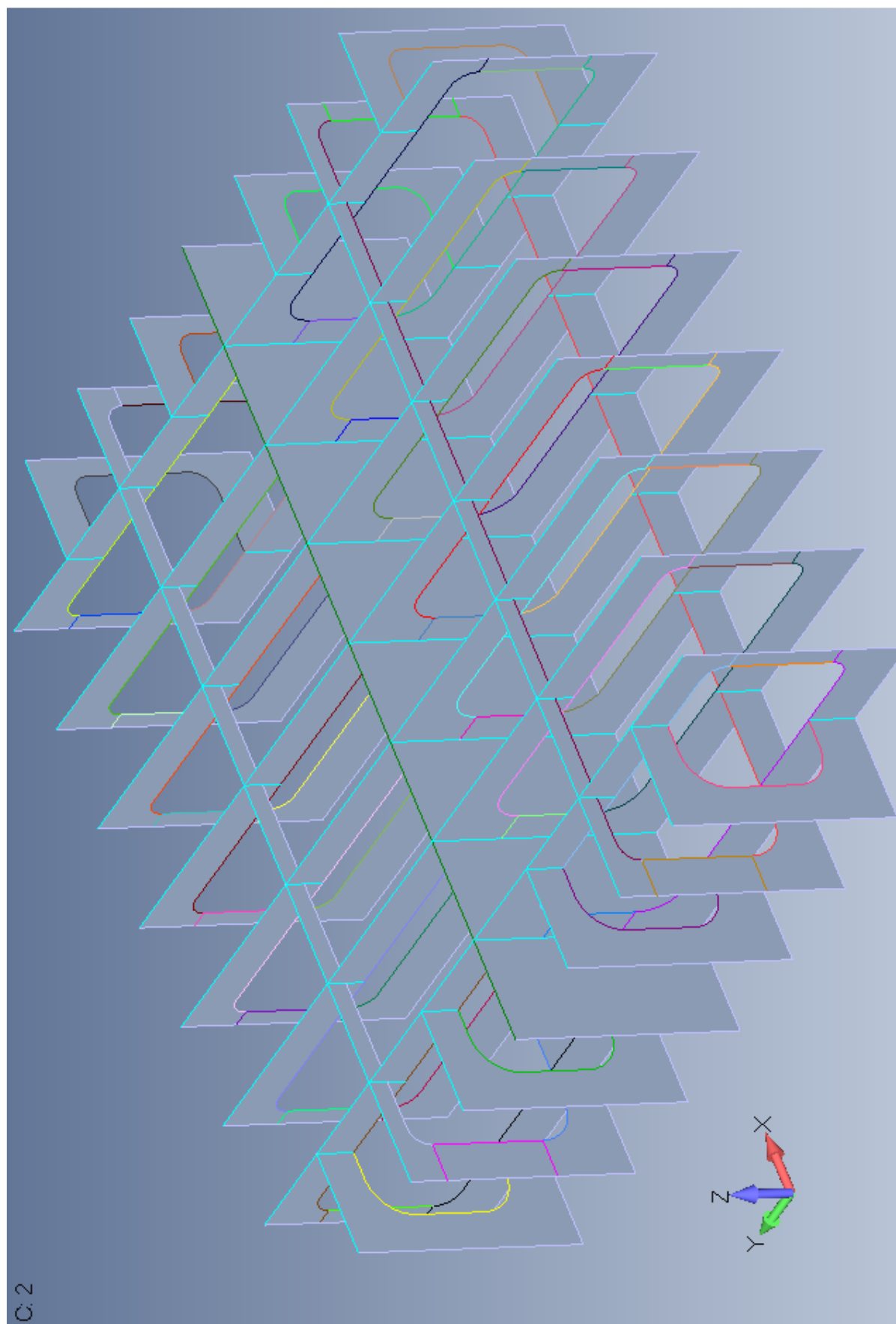
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Конструкция корпуса плавучего причала
(обязательное)



Трёхмерная модель конструкции причала со снятым настилом палубы



Трехмерная модель корпуса причала в районе 24-32 шп. без наружной обшивки, настила палубы и обшивки поперечной переборки на 24 шп.



ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Обзор требований зарубежных классификационных обществ к физико-механическим свойствам термопластов
(обязательное)

Г.1. Норвегия/Германия

Требования к минимальным ФМХ термопластов изложены в разделе 14 [29]. В Правилах [29] рассматривается 3 типа термопластов: АБС-пластик, ПСД и ПВД. Требования к ПНД не представлены. Требования DNV GL к ПЭ с указанием пороговых значений представлены в таблице Г.1, требования к АБС-пластику – в таблице Г.2.

Таблица Г.1. Требования DNV GL к минимальным характеристикам ПЭ

Свойство	Ед. изм.	ПВД	ПСД	Примечание
Плотность	г/см ³	≤ 0,930	0,930-0,945	-
Индекс текучести расплава	г/10 мин	± 1,0 от паспортного значения, но не более 3,5		-
Предел текучести при растяжении	МПа	7,5	13,0	при 20°C
		4,5	8,0	при 65 °C
Модуль упругости при пределе текучести	МПа	180	350	при 20°C
Предел ползучести при растяжении	%	не более 2,5 при напряжении 2,0 МПа	не более 2,0 при напряжении 3,0 МПа	после выдержки при 20°C в течении 100 часов
Твердость	по Шору D	± 3 от паспортного значения		при 20°C и считано через 15 сек
Ударная вязкость (испытание на падение без надреза)	Дж/ мм толщины	15		свободно закрепленный образец при температуре 0 °C
Ударная вязкость с надрезом (маятниковый тест с надрезом)	визуально	не хрупкое разрушение		только для лодок с одинарной обшивкой при 0°C
Содержание пор	% от толщины	не более 15		в конструктивных элементах
		не более 20		в других местах
Ударная прочность состаренного материала	визуально/ Дж/см ³	не хрупкое разрушение 1,0		состаренный материал, соответствующий 4 годам естественного старения,

Таблица Г.2. Требования DNV GL к минимальным характеристикам АБС-пластика

Свойство	Ед. изм.	АБС-пластик	Примечание
Предел текучести при растяжении	МПа	30	при 20°C
		18	при 65 °C
Модуль упругости	МПа	1600	при 20°C
Ползучесть	% деформации	не более 1,0	после выдержки при 20°C в течении 100 часов при приложении нагрузки 7 МПа
Усталостная прочность при изгибе	кол-во циклов	50 000	при амплитуде деформации 1% и частоте 0,5 Гц
Ударная вязкость с надрезом	кДж/м ²	2,0	при 20°C в соответствии с ISO 179 без надреза
Ударная прочность состаренного материала	кДж/м ²	2,5	состаренный материал, соответствующий 4 годам естественного старения

Г.2. Индия

Требования к минимальным ФМХ термопластов изложены в разделе 2 [30]. В руководстве [30] рассматриваются только ПЭ, АБС-пластик не рассматривается. При этом, Руководство [30] содержат минимальные требования ко всем 3 типам полиэтиленов: ПВД, ПСД и ПНД. Требования к ПВД и ПСД аналогичны требованиям DNV и GL [29] но с учетом дополнительных характеристик. Данные дополнительные характеристики представлены в таблице Г.3

Таблица Г.3. Дополнительные требования IRS к минимальным характеристикам ПСД и ПВД

Свойство	Ед. изм.	ПВД	ПСД	Примечание
Предел прочности при изгибе	МПа	8-15	20	-
Модуль упругости при изгибе	МПа	250	500	-
Предел прочности при сжатии	МПа	9,6	15	-
Модуль сдвига	МПа	8	12	-

Таким образом, индийское КО предъявляет более жесткие требования к ПСД и ПВД, чем КО Норвегии/Германии.

Требования к минимальным ФМХ ПНД представлены в таблице Г.4.

Таблица Г.4. Требования IRS к минимальным характеристикам ПНД

Свойство	Ед. изм.	ПНД	Примечание
Плотность	г/см ³	0,946-0,972	-
Индекс текучести расплава	г/10 мин	0,030 – 10	190 °C / 2,16 кг
Предел текучести при растяжении	МПа	17	-
Предел прочности при растяжении	МПа	24	-

Продолжение таблицы Г.6.

Свойство	Ед. изм.	ПНД	Примечание
Удлинение при пределе текучести при растяжении	%	1,0 – 27	-
Удлинение при разрыве при растяжении	%	10 – 1500	-
Модуль ползучести при растяжении	МПа	292	после 1000 часов
Напряжение при сжатии	МПа	20	-
Модуль сдвига	МПа	18	-
Предел прочности при изгибе	МПа	40	-
Модуль упругости при изгибе	МПа	750	-
Твердость	по шору D	± 3 от паспортного значения	-
Ударная вязкость (испытание на падение без надреза)	Дж/мм толщины	15	-
Ударная вязкость с надрезом (маятниковый тест с надрезом)	визуально	не хрупкое разрушение	-
Содержание пор	% от толщины	не более 15	в конструктивных элементах
		не более 20	в других местах
Ударная прочность состаренного материала	визуально/ Дж/см ³	не хрупкое разрушение 1,0	-
Число вязкости (пониженная вязкость)	мл/г	157,8 – 398,3	-
Водопоглощение	%	0,010 – 0,017	24 часа

Г.3. Италия

Требования к судам из термопластов изложены в [33]. В данных Правилах из термопластов рассматривается только ПНД – требования к его минимальным ФМХ изложены в части В, разделе 2 [33] и представлены в таблице Г.5.

Таблица Г.5. Требования RINA к минимальным характеристикам ПНД

Свойство	Ед. изм.	ПНД	Примечание
Плотность	г/см ³	0,946	-
Предел текучести при растяжении	МПа	22	-
Напряжение при разрушении при растяжении	МПа	30	-
Удлинение при пределе текучести при растяжении	%	13	-
Модуль упругости (модуль Юнга) при пределе текучести	МПа	950	-
Модуль сдвига при текучести	МПа	300	-
Предел текучести при сдвиге	МПа	14	-
Коэффициент Пуассона	-	0,45	-
Температура длительной эксплуатации	°C	80	-
Водопоглощение	%	0,010 – 0,017	24 часа

Г.4. Корея

Требования к судам из термопластов изложены в руководстве [56]. Корейское классификационное общество (Korean Register of Shipping – KR) из термопластов допускает использование только ПЭ. В приложении 2 [56] изложены требования к минимальным ФМХ термопластов. При этом, в руководстве [56], как и в Руководстве IRS [30], представлены отдельные требования для ПВД и ПСД, и отдельные для ПНД. Требования к минимальным физико-механическим характеристикам ПВД и ПСД представлены в таблице Г.6, а для ПНД – в таблице Г.7.

Таблица Г.6. Требования KR к минимальным характеристикам ПВД и ПСД

Свойство	Ед. изм.	ПВД	ПСД	Примечание
Плотность	г/см ³	≤ 0,930	0,930-0,945	-
Индекс текучести расплава	г/10 мин	± 1,0 от паспортного значения, но не более 3,5		-
Предел текучести при растяжении	МПа	7,5	13,0	при 20°C
		4,5	8,0	при 65 °C
Предел прочности при растяжении (материал в районе зоны сварного шва)	МПа	прочность основного материала на растяжение		испытание на растяжение основного материала в максимально толстом месте при температуре 20°C
Предел прочности при сжатии	МПа	9,6	15	-
Предел прочности при сдвиге	МПа	8	12	-
Предел прочности при изгибе	МПа	8-15	20	-
Модуль упругости при изгибе	МПа	250	500	-
Твердость	по Шору D	± 3 от паспортного значения		
Ударная вязкость (испытание на падение без надреза)	Дж/ мм толщины	15		при температуре 0 °C
Ударная вязкость с надрезом (маятниковый тест с надрезом)	визуально	не хрупкое разрушение		при температуре 0 °C
Содержание пор	% от толщины	не более 15		
Ударная прочность состаренного материала (с надрезом)	визуально	не хрупкое разрушение		при температуре 0 °C

Продолжение таблицы Г.6.

Свойство	Ед. изм.	ПВД	ПСД	Примечание
Водопоглощение	%	по паспортному значению		-
Температура тепловой деформации под нагрузкой	°С	45	55	-
Температура размягчения по Вика	°С	92	105	-

Таблица Г.7. Требования КР к минимальным характеристикам ПНД

Свойство	Ед. изм.	ПНД	Примечание
Плотность	г/см ³	0,946 – 0,972	-
Индекс текучести расплава	г/10 мин	0,030-10	190 °С / 2,16 кг
Предел текучести при растяжении	МПа	17	-
Предел прочности при растяжении	МПа	24	-
Удлинение при пределе текучести при растяжении	%	1,0 – 27	-
Удлинение при разрыве при растяжении	%	10 – 1500	если разрыва не произошло, предполагается удлинение в конце испытания.
Предел прочности при растяжении (материал в районе зоны сварного шва)	прочность основного материала на растяжение		испытание на растяжение основного материала в максимально толстом месте при температуре 20°С
Модуль ползучести при растяжении	МПа	292	после 1000 часов
Напряжение при сжатии	МПа	20	-
Модуль сдвига	МПа	18	-
Предел прочности при изгибе	МПа	24	-
Модуль упругости при изгибе	МПа	750	-
Твердость	по шору D	± 3 от паспортного значения	-
Ударная вязкость (испытание на падение без надреза)	Дж/мм толщины	не менее 15	при температуре 0 °С
Ударная вязкость с надрезом (маятниковый тест с надрезом)	визуально/ Дж/м	не хрупкое разрушение не менее 196	при температуре 0 °С

Продолжение таблицы Г.7.

Свойство	Ед. изм.	ПНД	Примечание
Содержание пор	% от толщины	не более 15	-
Ударная прочность состаренного материала (с надрезом)	визуально	не хрупкое разрушение	при температуре 0 °С
Водопоглощение	%	не более 0,017	-
Температура тепловой деформации под нагрузкой	°С	69	-
Температура размягчения по Вика	°С	120	-

Г.5. Франция

В Правилах [32] из термопластов рассматривается только ПНД – требования к его минимальным ФМХ изложены в разделе 10 [32] и представлены в таблице Г.8.

Таблица Г.8. Требования ВV к минимальным характеристикам ПНД

Свойство	Ед. изм.	ПНД	Примечание
Плотность	г/см ³	0,95	-
Предел текучести при растяжении	МПа	24	-
Удлинение при пределе текучести при растяжении	%	13	-
Модуль упругости (модуль Юнга) при пределе текучести	МПа	950	-
Модуль сдвига при текучести	МПа	300	-
Предел текучести при сдвиге	МПа	14	-
Коэффициент Пуассона	-	0,45	-
Температура длительной эксплуатации	°С	80	-

Г.6. Турция

В Правилах [31] рассматриваются только ПЭ, АБС-пластик не рассматривается. При этом, Правила [31] содержат минимальные требования ко всем 3 типам полиэтиленов: ПВД, ПСД и ПНД. Требования к ПВД и ПСД аналогичны требованиям IRS (см. таблицу Г.3). Требования к ПНД также аналогичны требованиям IRS [30], кроме того, что к минимальным свойствам ПНД (см. таблицу Г.1.) добавляется нормирование напряжения при разрыве при растяжении – не менее 14 МПа.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Акты о внедрении
(обязательное)

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»



«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора

Э.Н. БЕРЕЗИН А.О.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Романюты Дмитрия Александровича на тему: «Методика проектирования судовых корпусных конструкций из термопластов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.18 «Проектирование и конструкция судов» (технические науки).

Диссертационная работа Романюты Д.А. направлена на разработку прикладной методики, позволяющей определять размеры связей судовых корпусных конструкций из термопластичных материалов.

В настоящее время в России строится значительное количество малотоннажных судов из полиэтилена низкого давления – типичного представителя термопластов. Отсутствие нормативной базы для освидетельствования и одобрения подобных судов в РМРС затрудняет деятельность Регистра в отношении данного типа судов.

Основными результатами работы Романюты Д.А. являются: разработка прикладной методики определения размеров связей корпусных конструкций судов из термопластов, обоснование коэффициентов запасов прочности элементов корпусных конструкций, разработка модели материала полиэтилена низкого давления для проведения проверочных расчетов прочности судовых корпусных конструкций.

На основании выполненных исследований, были предложены и внедрены корректировки к нормативным документам РС, а именно новая формулировка пункта правил, касающаяся требований к проведению испытаний неметаллических материалов на ультрафиолетовое старение (п.2.3.10.1 части XIII «Материалы» Правил классификации и постройки морских судов (НД №2-020101-174) «Проба, размеры которой определяются, исходя из требуемого числа и размеров образцов, выдерживается в течение 30 сут. в полупогружном состоянии в искусственной морской воде температурой 23 ± 2 °С. в процессе выдержки, находясь на расстоянии 50 см от ультрафиолетовой лампы, проба должна ежедневно в течение 2 ч подвергаться облучению ультрафиолетовыми лучами длиной волны 200 — 400 нм с плотностью энергии излучения на поверхности пробы 70 — 100 Вт/м². Для создания указанной плотности энергии рекомендуемая мощность ультрафиолетового

излучения лампы составляет 210 — 350 Вт. После выдержки из пробы изготавливаются образцы для проведения необходимых испытаний.»).

Основные положения работы были доложены Романютой Д.А. на заседании секции «Конструкция корпуса, теория корабля, судовые устройства и материалы» научно-технического совета РМРС 24.03.2026 года. Секция заключила, что отдельные результаты работы Романюты Д.А. являются полезными для РС и приняла решение о рассмотрении возможности внедрения:

1. применительно к части XIII «Материалы» Правил классификации и постройки морских судов (НД №2-020101-174): – дополнить раздел 6 «Пластмассы и материалы органического происхождения» пунктом «Полиэтилен низкого давления» с указанием возможности изготовления судовых корпусных конструкций из полиэтилена низкого давления с изложением перечня необходимых физико-механических характеристик материала и их минимальных значений;

2. применительно к Правилам классификации и постройки морских судов в целом: разработать часть Правил, содержащую требования к конструкции и прочности судов из термопластов
в нормативные документы РС.

Материалы диссертационной работы Романюты Д.А. легли в основу технического задания для деятельности Рабочей группы «Разработка требований к конструкции и прочности судов малых размерений из полиэтилена низкого давления для включения в Правила РС» для формирования изменений в нормативную документация ФАУ «РМРС».



Помощник по научно-технической деятельности

И.А.Н.:

(подпись)

Кутейников Михаил Анатольевич
(Ф.И.О.)



Начальник отдела научно-исследовательской деятельности

К.Т.Н.

(подпись)

Семионичев Дмитрий Сергеевич
(Ф.И.О.)

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

191186, г. Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 7, литера А

тел. +7 (812) 312-39-85; e-mail: pobox@rs-class.org

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «КГТУ», к. ф.-м.н., доцент

Н.А. Кострикова

2026 года.



AKT

Об использовании результатов диссертационной работы аспиранта Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Калининградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «КГТУ») Романюты Дмитрия Александровича в учебном процессе ФГБОУ ВО «КГТУ»

Мы, нижеподписавшиеся, проректор по учебной работе ФГБОУ ВО «КГТУ», кандидат технических наук, доцент Устич В.И., директор института морских технологий, энергетики и строительства (ИМТЭС) ФГБОУ ВО «КГТУ», доктор технических наук, доцент Александров И.С., директор научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники (НОЦ СМИТ) ИМТЭС, кандидат технических наук Чуреев Евгений Андреевич составили настоящий акт о том, что оригинальные научные результаты диссертационной работы Романюты Д.А. на тему «Методика проектирования судовых корпусных конструкций из термопластов» внедрены в учебный процесс Университета, а именно:

1. результаты физико-механических испытаний термопластов для проектирования конструкций корпусов судов;
2. подход для определения размеров связей корпусных конструкций малотоннажных судов на начальных этапах проектирования;
3. конститутивная модель полиэтилена низкого давления, необходимая для выполнения проверочных расчетов прочности.

Указанные результаты используются в учебном процессе:

1. по направлению 26.03.02 – «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» при выполнении выпускных квалификационных работ и в лекционном материале учебного курса «Полимерные материалы в судостроении и судоремонте»;

2. по направлению 26.04.02 – «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» при выполнении научно-исследовательских работ магистрантов, а также в лекционном материале и на практических занятиях учебных курсов «Основы расчетов методом конечных элементов» и «Прикладные задачи методом конечных элементов в проектировании объектов морской техники».

Проректор по учебной работе,
ФГБОУ ВО «КГТУ», к.т.н., доцент



В.И. Устич

Директор ИМТЭС,
ФГБОУ ВО «КГТУ», д.т.н., доцент



И.С. Александров

Директор НОЦ СМИТ ИМТЭС,
ФГБОУ ВО «КГТУ», к.т.н.



Е.А. Чуреев

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Пояснительная записка в части актуализации требований Правил
Российского Морского Регистра Судоходства по проведению испытаний на ультрафиолетовое
старение
(обязательное)

Приложение
к письму исх. № 04/48
от 03.06.2025

Пояснительная записка

**Актуальные требования Правил РМРС в части проведения испытаний на
ультрафиолетовое старение**

Согласно п.2.3.10.1 части XIII «Материалы» [1], требования к проведению испытаний звучат следующим образом:

«...Проба, размеры которой определяются, исходя из требуемого числа и размеров образцов, выдерживается в течение 30 сут. в полупогружном состоянии в искусственной морской воде температурой 23 ± 2 °С. в процессе выдержки проба должна ежедневно в течение 2 ч подвергаться облучению ультрафиолетовыми лучами с помощью лампы мощностью 500 Вт, находящейся на расстоянии 50 см от пробы. После выдержки из пробы изготавливаются образцы для проведения необходимых испытаний...»

Пояснения требований к источнику ультрафиолетового излучения

В ответ на запрос ФГБОУ ВО «КГТУ» (исх. № 04/01 от 09.01.2025) об уточнении требований к источнику ультрафиолетового (далее – УФ) излучения, ФАУ «Российский Морской Регистр Судоходства» (далее – РМРС) письмом № 311-06-5568 от 15.01.2025 г, направил разъяснения, что нормируемые 500 Вт мощности относятся к мощности УФ излучения, а не к номинальной мощности самого источника излучения.

Обзор предыдущих версий Правил

С целью исключения возможных ошибок в требованиях к проведению данных испытаний, обусловленных регулярными изменениями Правил, был выполнен анализ требований к проведению испытаний на старение в соответствии с предыдущими версиями Правил.

Согласно материалам, изложенным на официальном сайте ФАУ «РМРС», самая старая версия Правил относится к 1977 г [2]. Согласно п. 2.3.6, части XIII [2], требования к проведению испытаний на старение звучат следующим образом:

«...Образец, размерами 200х300 мм и толщине не более 10 мм хранится в течение 30 суток в полупогруженном состоянии в 3-% растворе NaCl при температуре помещения. В период хранения образец должен ежедневно в течение 2ч подвергаться облучению УФ лучами с помощью лампы 500 Вт, находящейся на расстоянии 50 см от образца...»

Сравнивая актуальную формулировку требований Правил с Правилами 1977 г., можно выделить следующее:

1. в актуальных требованиях отсутствуют конкретные размеры образца;
2. в актуальных Правилах уточнены требования к температуре искусственной морской воды;
3. время выдержки образца в воде не изменилось – 30 дней;
4. параметры облучения материалы также не изменились – ежедневно в течение 2 часов подвергать образец облучению УФ излучением мощностью 500 Вт. Источник излучения должен находится на расстоянии 50 см от образца.

Среди вышеизложенных пунктов, наиболее важным является п. 4, определяющий условия облучения материала. Таким образом, для проведения испытаний требуется использовать лампу, с мощностью УФ излучения равной 500 Вт.

Затруднения в определении условий облучения материала

В ходе подготовки проведения испытаний было установлено, что обеспечить требуемые Правилами условия облучения **однозначно** не представляется возможным. Это обусловлено несколькими причинами:

1. использование источника, генерирующего 500 Вт УФ-излучения, находящегося на расстоянии 50 см от образца, позволяет создать различную плотность излучения (интенсивность) вблизи самого образца. В связи с чем, по итогу испытаний, можно получить абсолютно различный результат;
2. в актуальной трактовке Правил отсутствует указание, по выбору длины волны УФ-излучения, что также может существенно повлиять на результаты испытаний;
3. отсутствуют указания о взаимном расположении источника УФ-излучения и испытуемого образца. В зависимости от того, какая грань образца подвергается облучению, также можно получить различные результаты испытаний;

4. отсутствует указание о том, необходимо ли обеспечить приложение полной мощности (500 Вт) УФ излучения на испытуемый образец. В таком случае, в рамках испытательной камеры, необходимо собрать определенную оптическую схему, фокусирующую все генерируемое излучение в заданной области (в районе образца). Без применения оптической схемы, при расположении источника УФ излучения на расстоянии 50 см от образца, на образец придется некоторая, небольшая часть мощности всего генерируемого излучения.

В связи с вышеизложенным, проведение корректных испытаний на старение, согласно актуальным требованиям Правил с обеспечением повторяемости результатов, не представляется возможным. Полученные выводы были дополнительно обсуждены с представителями научно-образовательного центра «Фундаментальная и прикладная фотоника. Нанофотоника» ФГАОУ ВО «Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта». Данный центр занимается созданием и изучением оптических свойств новых материалов фотоники и нанотехнологий, а также развитием физических основ молекулярной спектроскопии [3], поэтому его сотрудники имеют большой опыт работы с различными излучениями и разработкой различных оптических схем. В итоге обсуждения, сотрудники НОЦ сформировали экспертное заключение о некорректности требований, изложенных в п. 2.3.10.1 [1]. Скан – копия экспертного заключения приложен к основному письму.

Поиск одобренных лабораторий

В связи с тем, что требования к проведению испытаний на старение в части обеспечения условий облучения, не изменялись с 1977 г (как было изложено выше), у сотрудников ФГБОУ ВО «КГТУ» была сформирована гипотеза, что в настоящий момент существуют испытательные лаборатории, одобренные РМРС, способные выполнить подобного рода испытания.

Был выполнен поиск лабораторий, представленных на официальном сайте ФАУ «РМРС». Поиск осуществлялся по двум критериям:

1. вид испытаний: климатические испытания. Если в свидетельстве о признании имеется более подробная информация, то акцент уделялся именно ультрафиолетовому старению;
2. наименование испытываемой продукции – неметаллические или полимерные материалы.

На проведение климатических испытаний, согласно данным, представленным на сайте РМРС, одобрено около 80 испытательных лабораторий. Большая часть лабораторий одобрена на проведение климатических испытаний электрооборудования, кабельной продукции, систем защитных покрытий и т.д. Среди них, только **две** потенциально имеют возможность проведения искомых испытаний. Информация по данным лабораториям представлена в таблице 1.

Таблица 1. Лаборатории, одобренные на проведение климатических испытаний на полимерных и неметаллических материалах

Наименование лаборатории	Свидетельство об одобрении	Наименование испытываемой продукции	Коды и виды испытаний
Автономная некоммерческая организация "Центр испытаний, сертификации и стандартизации функциональных материалов и технологий"	№ 24.03.01.09762.120 от 15.10.2024	1. Неметаллические материалы. 2. Полимерные материалы. 3. Полимерные композиционные материалы. и т.д.	21001100 – Физико-химические измерения и испытания. 21001500 – Механические измерения и испытания 21002100 – Климатические испытания
НИЦ "Курчатовский институт" – ЦНИИ КМ "Прометей", лаборатория № 112 НПК-11 "Полимерных композиционных корпусных материалов"	№ 23.03.01.00855.120 от 23.01.2023	1. Полимерные и композиционные материалы, ткани, ровинги, нити	21002100 Климатические испытания и др.

В ходе общения с представителями обеих лабораторий было установлено следующее:

- НИЦ "Курчатовский институт". Представители лаборатории сообщили, что проводят испытания на УФ старение только полимерных защитных материалов. В отношении требований, изложенных в п. 2.3.10.1 [1] сообщили, что не используют их в качестве условий проведения испытаний.

- АНО «ЦИСИС ФМТ». Представитель данной лаборатории сообщил достаточно подробную информацию в отношении проведения испытаний на УФ старение. Для проведения испытаний лаборатория использует две камеры, информация о которых представлена ниже из рабочей переписки:

«...Мы проводим испытания на старение под воздействием УФ-излучения.

Для данных испытаний у нас есть 2 камеры.

1. Везерометр (weather-ometer) Ci4000. Производство фирмы «ATLAS MTT GmbH», США.

Технические характеристики:

Диапазон аттестованных температур: от 40 до 80 °C

Отклонение среднего значения воспроизводимой температуры от заданной: ± 2 °C

Диапазон длин волн: 300-400 нм

Диапазон энергетической освещенности: 29-141 Вт/м²

Отклонение среднего значения воспроизводимой энергетической освещенности от заданного: ± 5 Вт/м²

Аттестованный диапазон воспроизводимой относительной влажности:

- в световом цикле: от 25 до 50% (в диапазоне температур от 40 до 65°C)

- в темновом цикле: от 30 до 80 % (в диапазоне температур от 40 до 60°C)

Отклонение среднего значения воспроизводимой относительной влажности от заданного: $\pm 10\%$

Увлажнение, орошение образцов, орошение рамок 0,2 л/мин (не проверялось при аттестации)

Мощность ксеноновой лампы 6500 Вт. Рабочий диапазон 1700-4500 Вт.

2. Камера искусственной погоды для испытаний материалов на стойкость к ультрафиолетовому солнечному излучению модель MT-615 UV Test. Производство фирмы ООО "Метротекс", Россия.

Технические характеристики:

Источник света: восемь ламп 313 UVB или 340 UVA

Номинальная минимальная интенсивность облучения: 0,35 Вт/м² (UVA, UVB)

Номинальная максимальная интенсивность облучения: 1,55 Вт/м² (UVA), 1,23 Вт/м² (UVB)

Диапазон температур черной панели: Цикл УФ-облучения – температура BPT 35°C – 80°C

Диапазон температур черной панели: Цикл конденсации – температура BPT 35°C – 60°C...»

Как следует из описания, первая камера обладает источником излучения с рабочим диапазоном 1700-4500 Вт (что больше требуемых 500 Вт). Лампа 340 UVA, являющаяся источником УФ излучения у второй камеры, обладает мощностью излучения около 40 Вт [4]. Таким образом, восемь подобных ламп обеспечивают мощность излучения 320 Вт, что также не соответствует требуемым 500 Вт.

Обсуждая процедуру проведения испытаний на УФ старение, испытательная лаборатория сообщила следующую информацию:

«...Конструкция нашего везерометра не позволяет облучать погруженные в жидкость образцы. Образцы закрепляются в держателях и вращаются вокруг ксеноновой лампы.

Мы проводили аналогичные испытания, но условия были следующие:

Пункт 2.3.10.1.... Проба, размеры которой определяются, исходя из требуемого числа и размеров образцов, выдерживается в течение 30 сут. в погружном состоянии в искусственной морской воде (5% раствор NaCl) температурой 23 ± 2 °C.

Выдержка в растворе 22 ч, затем извлекается проба и подвергается в течение 2 ч облучению УФ. Проба должна ежедневно в течение 2 ч подвергаться облучению ультрафиолетовыми лучами с помощью лампы с минимальной интенсивностью излучения 29 Вт/м², находящейся на расстоянии 30 см от пробы...»

В данной процедуре проведения испытаний, наблюдаются существенные расхождения с требуемой Правилами процедурой проведения испытаний (нормирование интенсивности излучения, расстояние до образца, вращение ламп вокруг образца и т.д.). При этом представитель лаборатории пояснил, что испытания были выполнены по техническому заданию Заказчика на проведение сертификационных испытаний образцов новых полимерных композиционных материалов. Информация о согласовании отклонений от требований Правил у представителя лаборатории отсутствует.

Таким образом, испытательных лабораторий, одобренных РМРС, способных в полной мере обеспечить требования Правил по проведению испытаний на УФ старение, **не выявлено.**

Анализ требований зарубежных классификационных обществ (КО)

РМРС длительное время являлся членом Международной Ассоциации Классификационных Обществ (далее – МАКО). На основании этого было сформировано предположение, что данное испытание на УФ старение может быть описано подробнее в других КО МАКО. В таком случае, можно будет уточнить детали проведения испытаний, в соответствии с требованиями Правил зарубежных КО.

В связи с этим, был проведен анализ требований к испытаниям полимерных материалов. Были просмотрены требования Правил всех КО МАКО:

1. American Bureau of Shipping (ABS);
2. Bureau Veritas (BV);
3. China Classification Society (CCS);
4. DNV GL (Det Norske Veritas Germanischer Lloyd);
5. Indian Register of Shipping (IRS);
6. Lloyd's Register (LR);

7. Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK);
8. Polski Rejestr Statków (PRS);
9. Registro Italiano Navale (RINA);
10. Turkish Lloyd (TL);
11. Croatian Register of Shipping (CRS);
12. Korean Register of Shipping (KR).

Дополнительно, были просмотрены Правила других КО, не входящих в МАКО:

1. Indonesian Classification Bureau (BKI);
2. Philippine Register of Shipping (PRS);
3. Iranian Classification Society (ICS);
4. Bulgarian Register of Shipping (BRS);
5. Ukrainian Shipping Register (USR);
6. Romanian Register of Shipping (RNR);
7. Hellenic Register of Shipping (HR);
8. Brazilian Register of Shipping (RBNA);
9. Malaysian Shipping Register (MSR);
10. Panama Maritime Documentation Services (PMDS).

В результате анализа требований Правил зарубежных КО было установлено, что большая часть КО не требует проведения испытаний на УФ старение, за следующим исключением:

1. Турецкое (TL) и Индийское (IRS) классификационные общества в отношении полимерных материалов ссылаются на стандарт DIN 53387 «Пластмассы и эластомеры. Испытание на искусственное старение с применением фильтруемого излучения ксеноновой лампы с дугой» [5]. Согласно п. 5.1.1 [5], мощность излучения должна быть выбрана таким образом, чтобы среднечасовая освещенность между длинами волн 290 и 800 нм на уровне образца составляла предпочтительно 550 Вт·м². При этом суммарная мощность УФ излучения никак не нормируется.

2. Японское классификационное общество (ClassNK) рассматривает данный вид испытаний исключительно для материалов спасательных шлюпок, регламентируя их проведение согласно стандарту ISO 4892-2 "Пластмассы – Методы искусственного облучения лабораторными источниками света – Часть 2: Ксеноновые лампы". [6]. Согласно таблицам 3 и 4 [6], испытания проводятся при интенсивности облучения 50-60 Вт/м². Длина волны излучения – 300-400 нм. При этом суммарная мощность УФ излучения также никак не нормируется.

Следует отметить, что согласно п. 6.11.2.1 [1], рассматривая физико-механические свойства полимерных композиционных материалов для изготовления несущих напряженных

элементов конструкции судовых кранов, Правила диктуют проводить испытания на воздействие УФ излучения согласно [6], но не согласно п. 2.3.10.1 [1].

Таким образом, требования п. 2.3.10.1 [1], в части условий облучения существенно отличаются от требований Правил зарубежных КО.

Анализ требований ГОСТ к проведению испытаний на УФ старение

Требования РМРС к проведению испытаний полимерных материалов на УФ старение вполне обосновано, поскольку многие неметаллические материалы (особенно термопласты) склонны к проявлению фотодеструкции – ускорению разрушения материала под действием агрессивных компонентов атмосферы — кислорода, озона, оксида азота. В результате ухудшаются механические свойства полимера. Ввиду того, что корпус судна, изготовленный из данного материала, большую часть времени находится под действием солнца, он все время находится под воздействием УФ излучения, которое и способно спровоцировать явление фотодеструкции.

Однако, не только судовые корпусные конструкции из полимерных материалов склонны к деструкции со временем – также можно сказать и о многих других полимерных материалах, находящихся под непрерывным воздействием солнечного света. К примеру, ПВХ профили окон также подвергаются воздействию ультрафиолета, как следствие, данный материал также должен быть проверен на ультрафиолетовый старение.

На основании вышеизложенного, было принято решение проанализировать другие нормативные документы (ГОСТы, ОСТы и т.д.) по проведению испытаний на УФ старение на предмет нормируемых параметров облучения материала.

ГОСТ 9.708-83 «Пластмассы. Методы испытаний на старение при воздействии естественных и искусственных климатических факторов» [7] обуславливает проведение испытаний пластмасс на старение, в том числе, под воздействием УФ излучения. Согласно [7], испытания допускается проводить с помощью аппарата искусственной погоды (далее – АИП). Согласно п. 2.3 [7], АИП должен обеспечивать световой поток с поверхностной плотностью энергии интегрального излучения 1000 Вт/м^2 . При этом плотность потока энергии ультрафиолетового излучения в области длин волн короче 400 нм должна быть не менее 68 Вт/м^2 .

ГОСТ 30973-2002 «Профили поливинилхлоридные для оконных и дверных блоков. Метод определения сопротивления климатическим воздействиям и оценки долговечности» [8] определяет проведение различных видов ускоренных климатических испытаний, в том числе, и на воздействие УФ излучения. Согласно таблице 1 [8], испытания на воздействие УФ излучения проводят при интенсивности УФ 80 Вт/м^2 . Длина волны – $280\text{-}400 \text{ нм}$.

Таким образом можно заметить, что в ГОСТ при проведении испытаний на УФ старение, нормируется необходимый диапазон длин волн (нм) и показатель интенсивности облучения (Вт/м^2).

Анализ научных статей по вопросы исследования влияния УФ излучения на полимерные материалы

Рассматривая корректность формулировки условий проведения испытаний на старение под воздействие ультрафиолетового облучения, также целесообразно обратиться к различным научным публикациям. В случае, если в статье рассматривается влияние воздействия УФ излучения на свойства материала, то должна быть подробно описаны условия облучения материала.

В работе [9], исследовалось влияние УФ излучения на свойства чистого полиэтилена низкого давления (ПНД) и ПНД с некоторыми добавками. Облучение материала выполнялось при интенсивности облучения 78 Вт/м^2 с помощью лампы, генерирующей излучение с длиной волны 365-450 нм.

В статье [10] рассматривается влияние содержания лигнина на фотодеструкцию композитного материала, состоящего из ПНД и древесины. Облучение УФ выполнено при интенсивности $0,71 \text{ Вт/м}^2$ при длине волны 313 нм.

В работе [11] описано влияние УФ излучения на поверхностные свойства модифицированных сверхмодульных полиэтиленовых волокон. При проведении экспериментов в качестве источников ультрафиолетового (УФ) излучения использовались ртутные лампы различной мощности, работающие в режиме длин волн 200-400 нм. Интенсивность излучения на поверхности волокон на расстоянии 0,80 м от ламп составляла $3,0 \times 10^{14}$ и $5,5 \times 10^{14}$ фотон/ см^2 соответственно.

В статье [12] исследуется влияние УФ-облучения на скорость разрушения полимеров. Опыты с облучением проводились при интенсивности потока УФ-излучения 140 Вт/м^2 в интервале длин волн 240–300 нм.

Таким образом, можно отметить, что в каждой работе при описании режимов облучения нормируется необходимо значение интенсивности излучения и соответствующей длины волны

Заключение

Обобщая представленную информацию, можно заключить, что текущие требования Правил по проведению испытаний на УФ старение, изложенные в п. 2.3.10.1 [1] требуют уточнений, в пользу чего свидетельствуют следующие аргументы:

1. отсутствие лабораторий, одобренных на проведение подобных испытаний. Единственная лаборатория, которая может рассматриваться как «подходящая» (АНО «ЦИСИС ФМТ») выполняет подобные испытания, но на таких режимах и оборудовании, которое не соответствует п. 2.3.10.1 [1];

2. отсутствие аналогичных требований к проведению испытаний в Правилах зарубежных КО. В некоторых Правилах зарубежных КО (Турция, Индия, Япония) имеются схожие требования, но условия проведения испытаний существенно отличаются. При этом, в п. 6.11.2.1 [1], относящемся к полимерным материалам для судовых кранов, имеется требование на проведение испытаний на УФ старение, но ссылка указывает не на п. 2.3.10.1 [1], а на ISO 4892-2, упоминаемом в Японском классификационном обществе;

3. использование в отечественных ГОСТ, предписывающих испытание на УФ старение иных полимерных материалов, критериев и режимов, отличающихся от п. 2.3.10.1 [1];

4. информация в различных научных работах по характеристикам режимов облучения полимерным материалов, отличающаяся от информации, представленной в п. 2.3.10.1 [1], но схожая между различными независимыми работами (нормирование интенсивности облучения и длины волны);

5. экспертное заключение компетентных специалистов с научно-образовательного центра.

В соответствии со всеми вышеизложенными аргументами, в текущие требования Правил по проведению испытаний на УФ старение предлагается ввести следующие изменения:

1. указать необходимую интенсивность (плотность энергии) излучения в районе испытываемого образца (в «Вт/м²»);

2. указать диапазоны длины волны УФ излучения, допустимые для проведения испытаний (в «нм»);

3. уточнить позиционирование испытываемого образца относительно источника излучения (должен ли он облучаться со всех сторон, путем вращения источника излучения вокруг образца, допускается ли облучение только одной грани и т.д.). Рекомендуется сопроводить данное требование схематическим изображением.

Список источников

1. Правила Классификации и постройки морских судов. Часть XIII «Материалы». Российский Морской Регистр Судоходства. Санкт-Петербург, 2025 г.
2. Правила Классификации и постройки морских судов. В двух томах, том II. Регистр СССР. Издательство «Транспорт». Ленинград. 1977 г.
3. НОЦ «Фундаментальная и прикладная фотоника. Нанопотоника».
<https://kantiana.ru/science/departments/notes-fundamentalnaya-i-prikladnaya-fotonika-nanofotonika/>
4. Лампа ультрафиолетовая NARVA F48T12 40W/UVA-340 1200mm G13.
https://uvintech.ru/catalog/lamps/ultraviolet/lampa_ultrafioletovaya_narva_f48t12_40w_uva_340_1200mm_g13/
5. DIN 53387-1989 Пластмассы и эластомеры. Испытание на искусственное старение с применением фильтруемого излучения ксеноновой лампы с дугой.
6. ISO 4892-2 "Пластмассы – Методы искусственного облучения лабораторными источниками света – Часть 2: Ксеноновые лампы".
7. ГОСТ 9.708-83 «Пластмассы. Методы испытаний на старение при воздействии естественных и искусственных климатических факторов»
8. ГОСТ 30973-2002 «Профили поливинилхлоридные для оконных и дверных блоков. Метод определения сопротивления климатическим воздействиям и оценки долговечности»
9. Qiao, M., Ran, Q., Wu, S., & Shen, J., 2009. Impact of ultraviolet radiation on HDPE and HDPE/STC blends. *Polymers for Advanced Technologies*, 20, pp. 341-346.
10. Chaochanchaikul, K., Jayaraman, K., Rosarpitak, V., & Sombatsompop, N., 2011. Influence of lignin content on photodegradation in wood/HDPE composites under UV weathering. *BioResources*.
11. Гришанова И. А., Абдуллин И. Ш., Абуталипова Л. Н., Мигачева О. С.. "Влияние ультрафиолетового излучения на поверхностные свойства модифицированных сверхмодульных полиэтиленовых волокон" *Вестник Казанского технологического университета*, № 16-2, 2013, с. 102-104.
12. Бобоев, Т. Б. Исследование влияния УФ-облучения на скорость разрушения полимеров / Т. Б. Бобоев, С. Д. Гафуров, Ф. Х. Истамов // *Прикладная физика*. – 2020. – № 5. – С. 93-96.