

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
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»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Калининград
2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Калининградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «КГТУ»).

Научный руководитель: **Чурсев Евгений Андреевич** - кандидат технических наук.

Официальные оппоненты: **Кочнев Юрий Александрович** - доктор технических наук, доцент, профессор кафедры проектирования и технологии постройки судов ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»).

Назаров Альберт Георгиевич - кандидат технических наук, генеральный директор ООО «АН Марин Консалтинг»

Ведущая организация: Федеральное автономное учреждение «Российский морской регистр судоходства» (ФАУ «РМРС»).

Защита состоится «24» декабря 2026 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 37.2.007.02 на базе ФГБОУ ВО «КГТУ» по адресу: 236040, г. Калининград, ул. Профессора Баранова, д. 43, зал диссертационного совета (аудитория 101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» по адресу https://klgtu.ru/upload/dissertations/romanyuta/romanyuta_diss.pdf

Отзывы на автореферат, в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, следует направлять по адресу: 236022, г. Калининград, Советский пр., д. 1, ФГБОУ ВО «КГТУ», диссертационный совет 37.2.007.02.

Автореферат разослан «___» _____ 202__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета 37.2.007.02, д.п.н., профессор



Бугакова Нина
Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Термопласты – полимерные материалы, способные обратимо переходить при нагревании в высокоэластичное либо вязкотекучее состояние. Данные материалы применяются в различных отраслях промышленности, в том числе, и в судостроении, где наиболее востребованным термопластом является полиэтилен низкого давления (далее - ПНД). Из ПНД изготавливают моторные лодки, катера, хаусботы и другие малотоннажные суда и плавучие объекты, размерами не более 15-20 метров.

В то же время, в Правилах Российского Морского Регистра Судоходства (далее – РМРС, РС) и Российского Классификационного Общества (далее – РКО), требования к конструкции корпуса судна (далее – ККС) из термопластов отсутствуют. Зарубежный опыт проектирования судовых корпусных конструкций (далее – СКК), представленный в Правилах иностранных классификационных обществах (далее – КО), базируется, в основном, на аналитическом методе расчета с помощью модели изотропного и линейно-упругого материала, однако такой подход может привести к ошибочному выбору размеров связей, ввиду неучета реальных физико-механических характеристик (далее – ФМХ) материала.

На основании вышеизложенного, требуется новая методика, позволяющая корректнее определять размеры связей ККС из термопластов.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями применения ПНД в качестве основного конструкционного материала (далее – ОКМ) в отечественной практике ранее занимались А.Г. Назаров, С.А. Королев и В.В. Гусев. За рубежом, данное направление разрабатывалось подробнее, за счет трудов М. Kafali, S.S. Cho, W.D. Aryawan, D. Setyawan, N. Saputra и других специалистов, но методика определения размеров связей ККС в данных работах практически не затронута. Рекомендации по выбору размеров связей представлены также в Правилах КО Италии, Франции, Турции, Индии, Норвегии/Германии и Хорватии. Тем не менее, они или недостаточно информативны, или не учитывают ключевые особенности материала.

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 отечественными КО;

2) предложено применение непластифицированного поливинилхлорида (далее – НПВХ, жесткий ПВХ) в качестве ОКМ для малотоннажных судов и плавучих объектов;

3) уточнены коэффициенты использования прочности (далее – 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 размеров 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 напряженно-деформированного состояния СКК, обусловленное как внешними факторами (скорость и температура нагружения), так и внутренними (нелинейная вязкоупругость материала).

Положения, выносимые на защиту:

- 1) структура методики проектирования СКК из термопластичных материалов;
- 2) перечень ФМХ термопластов, необходимый для одобрения материала в РС с целью его использования в качестве ОКМ;
- 3) критерии прочности и жесткости при проектировании ККС из термопластов;
- 4) коэффициенты конститутивной модели ПНД для выполнения проверочных расчетов прочности;
- 5) 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 задач 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 г.;
- XIV Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии» в рамках XIV Международного Балтийского Морского Форума, Калининград, 2026 г.;
- 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.;
- всероссийская научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Научно-технологическое развитие судостроения-2026». ФГУП «КГНЦ», Санкт-Петербург, 2026 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».

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

Соответствие паспорта 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, определяются его цели и задачи, обозначаются практическая и теоретическая значимость, новизна полученных результатов и другие характеристики диссертации.

В первой главе представлен анализ существующих методик проектирования судовых корпусных конструкций из термопластов и выбор объекта проектирования.

Так как в отечественной судостроительной практике отсутствуют правила и требования в части выбора размеров связей СКК из термопластов, был выполнен обзор требований Правил зарубежных КО. Требования к проектированию ККС из термопластов присутствуют в КО Хорватии, Норвегии/Германии, Турции, Индии, Италии и Франции.

Анализ Правил зарубежных КО позволил выделить два основных подхода к выбору размеров связей:

1) Правила КО Хорватии, Норвегии/Германии, Индии и Турции нормируют значение минимальной толщины наружной и внутренней (при использовании двух/трехслойной конструкции) обшивки судна на основе эмпирической зависимости. Требования к определению размеров связей прочих элементов конструкции корпуса отсутствуют. Рассматриваемые материалы – полиэтилены и акрилонитрилбутадиенстирол (АБС-пластик);

2) Правилами КО Италии и Франции предлагается аналитический расчет конструкции корпуса судна, при применении к полиэтилену модели изотропного и линейно-упругого материала (по аналогии с расчетом алюминиевых конструкций) Рассматриваемый материал – ПНД.

Первый подход не позволяет определить размеры других элементов конструкции корпуса судна, за исключением наружной обшивки. С использованием второго подхода можно определить все необходимые размеры связей, однако, в таком случае, реальные ФМХ термопласта, к которым можно отнести ползучесть, релаксацию и пр., никак не учитываются.

Необходимость учета физико-механических свойств термопластов показана на примере сравнения экспериментального и расчетного определения перемещений для балок и пластин, работающих на изгиб из ПНД. Результаты показали, что разница между экспериментальными значениями прогибов и расчетными (полученными с помощью модели изотропного и линейно-упругого материала) может достигать 47%.

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

В качестве объекта проектирования выбрана конструкция корпуса плавучего причала, длиной 16 метров. Чертеж общего расположения причала с главными размерениями представлен на рисунке 1.

Принимая во внимание тот факт, что среди термопластов в малотоннажном судостроении в подавляющем большинстве случаев применяется ПНД, данный материал в диссертационном исследовании рассматривается в качестве основного.

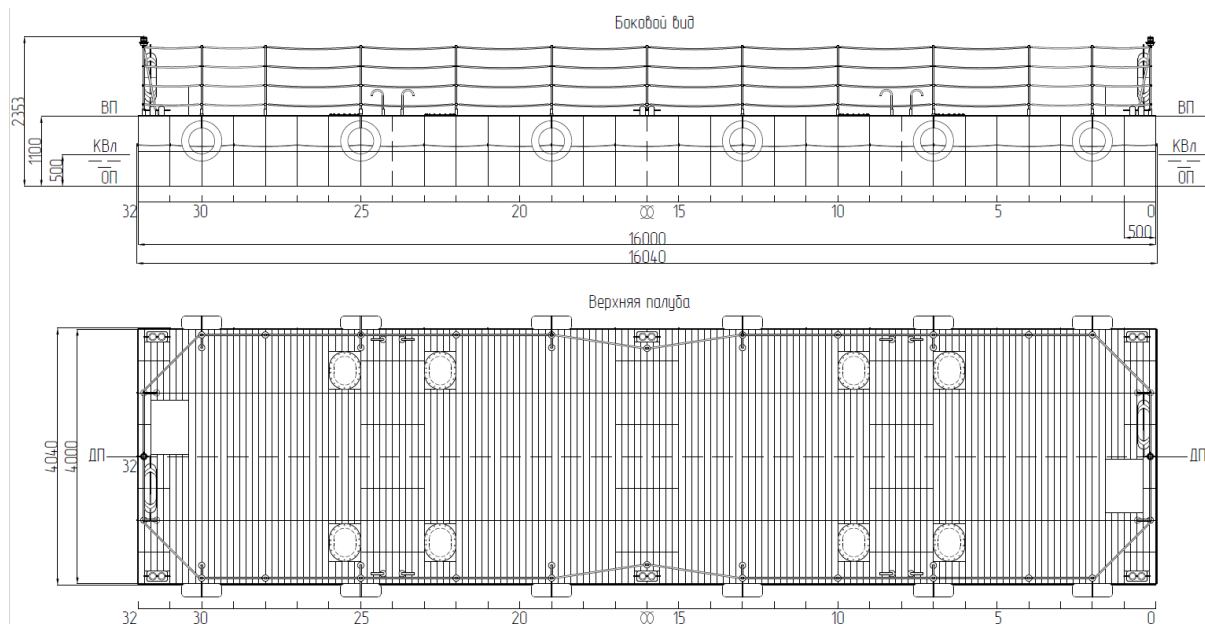


Рисунок 1 – Чертеж общего расположения плавучего причала

Во второй главе описана предлагаемая методика проектирования ККС из термопластов, состоящая из 3 основных 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.

В рамках I этапа методики выполняется выбор основного конструкционного материал. Для этого, с учетом опыта зарубежных КО, был разработан перечень минимально необходимых характеристик термопластов, необходимых для его одобрения отечественными КО в качестве ОКМ. Данный перечень, с указанием стандартов на проведение испытаний, представлен в таблице 1 (1-4 столбцы). Также в таблице отражены пороговые значения свойств

для ПНД (5 столбец), полученные на основании анализа требований Правил зарубежных КО, и различных научных публикаций.

Таблица 1 – Требуемые и фактические ФМХ термопластов

Свойство	Ед. изм.	Нормативные документы		ПНД (порог.)	ПНД ТК (факт.)	НПВХ ВХЗ (факт.)
		Отечест.	Зарубеж.			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Плотность	г/см ³	ГОСТ 15139-69	ISO 1183-1	0,946	0,967	1,447
Предел текучести при растяжении	МПа	ГОСТ 34370-2017 ГОСТ 11262-2017	ISO 527-1:2012	22	23,7	51
Относительное удлинение при пределе текучести при растяжении	%			13	17,8	6,68
Модуль упругости (модуль Юнга) при растяжении	МПа			950	967	3204
Коэффициент Пуассона	-			0,45	0,446	0,337
Модуль сдвига	МПа	ГОСТ Р 57207-2016	ASTM D732-2010	300	730	2574
Предел текучести при сдвиге	МПа			14	14,7	35,3
Водопоглощение	%	ГОСТ 4650-80	ISO 62:2008	0,010 – 0,017	0	0,0170
Предел прочности при изгибе	МПа	ГОСТ 4648-2014	ISO 178:2010	40	30,4	84,1
Модуль упругости при изгибе	МПа			750	864	3208
Температура тепловой деформации	°C	ГОСТ 34371-2017	ISO 75-1:2020 ASTM D648-2007	70	-	-

Данные результаты были рассмотрены специалистами РМРС и получили одобрение на внедрение в Правила РС.

В качестве возможной альтернативы ПНД, в диссертационном исследовании рассмотрен термопласт, ранее не применяемый в отрасли в качестве ОКМ – непластифицированный поливинилхлорид. Согласно данным, представленным в открытых источниках, ФМХ у НПВХ лучше, чем у ПНД, следовательно, данный материал может оказаться более перспективным, чем ПНД.

С целью сравнения ФМХ ПНД и НПВХ, на базе лабораторного комплекса научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники ФГБОУ ВО «КГТУ», был выполнен комплекс испытаний всех основных видов НПВХ, представленных в текущий момент на рынке России.

Проведены испытания трех видов НПВХ отечественного производства, и одного НПВХ, импортируемого из Китая. В таблице 1 представлены отдельные результаты выполненных испытаний – в столбце 6 приведены результаты испытаний ПНД марке РЕ100, производства компании ООО «Техноком» (далее – ПНД ТК), а в столбце 7 - НПВХ производства ПАО «Владимирский Химический Завод» (далее – НПВХ ВХЗ). Результаты испытаний свидетельствуют о том, что физико-механические характеристики НПВХ существенно лучше, чем у ПНД. На данном основании можно сделать вывод о потенциальной возможности использования НПВХ в качестве ОКМ.

В рамках II этапа методики выполняется определение минимально допустимых размеров связей, а также расчет элементов конструкции корпуса традиционным способом, аналогично подходу, используемому в Правилах РС для металлических судов, с применением КИП (величины, обратной коэффициенту запаса прочности) II этапа.

В качестве требований к минимальным размерам связей предложены минимальная толщина наружной обшивки судна и максимальное отношение высоты к толщине балки полосового профиля.

Значение минимальной толщины наружной обшивки корпуса из ПНД выбрано на базе статистики, собранной по 27 судам различных проектов отечественной и зарубежной постройки. Зависимость толщин бортовой и днищевой обшивки судов из ПНД различных проектов в зависимости от длины судна представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.

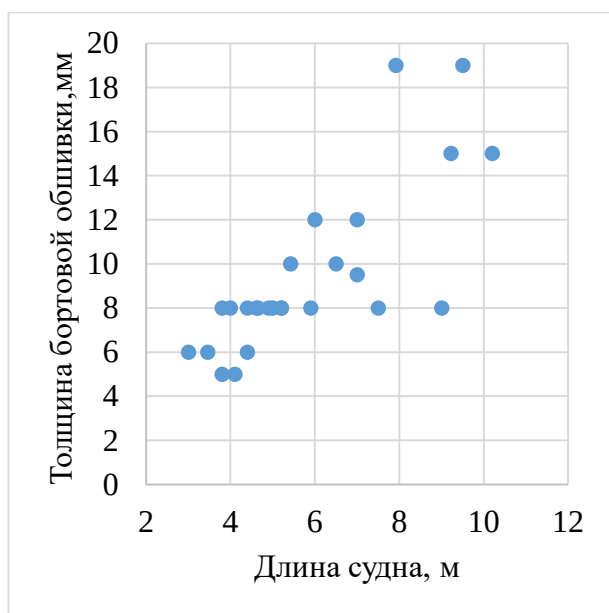


Рисунок 2– Толщины бортовой обшивки судов в зависимости от длины судна

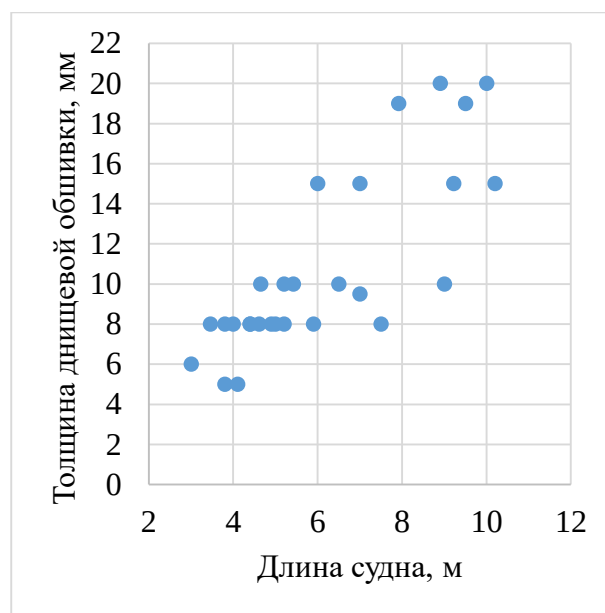


Рисунок 3– Толщины бортовой обшивки судов в зависимости от длины судна

По результатам анализа данных, минимальная толщина наружной обшивки, для судов из ПНД, принята равной 6,0 миллиметрам. Для других термопластов, данное значение может быть пересчитано через величину цилиндрической жесткости пластины (при известных значениях модуля упругости на растяжение и коэффициента Пуассона): так, для НПВХ ВХЗ минимальная толщина составила 4 мм.

Максимальное отношение высоты балки набора к ее толщине при использовании полосового профиля для термопластов может быть определено через критерий предельно допустимой гибкости стенки балки, принятый равным 2,0 (при известных значениях предела текучести и модуля упругости на растяжение). Так, для ПНД и НПВХ максимальное отношение высоты балки набора к ее толщине получилось равным 9,0.

Определение КИП II этапа, необходимых для выбора предварительных размеров связей, представлено в 3 главе диссертации.

Реализация III этапа методики выполняется в программных пакетах с использованием метода конечных элементов и специальной конститутивной модели материала (далее – СКММ), учитывающей реальные свойства термопластов, а также коэффициентов использования прочности III этапа.

На основании анализа различных источников, в качестве расчетной СКММ, выбрана трехсетевая модель материала (далее – ТММ). Реологическое представление ТММ приведено на рисунке 4.

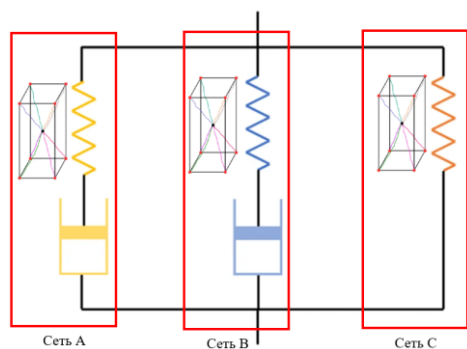


Рисунок 4 – Реологическое представление ТММ

ТММ состоит из трех параллельных сетей А, В и С: 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.

Определяющие уравнения ТММ описываются 16 коэффициентами. Расчет указанных коэффициентов, а также определение КИП III этапа, представлено в 3 главе диссертации.

В третьей главе описано обоснование и определение КИП II и III этапов, а также выбор коэффициентов определяющих уравнений ТММ.

В качестве исследуемых материалов выбраны:

1) полиэтилен низкого давления производства компании ООО «Лада-Лист» (далее – ПНД ЛЛ);

2) непластифицированный поливинилхлорид производства ПАО «Владимирский Химический Завод» - НПВХ ВХЗ.

На II этапе проектирования предлагаемой методики, КИП должны учитывать все особенности материала, не учитываемые в расчетах на III этапе проектирования – вязкоупругость, чувствительность к температурным изменениям, чувствительность к скорости нагружения и т.д., следовательно, КИП III этапа должны быть отличными от КИП II этапа, поскольку некоторые из свойств материала, не учитываемые на II этапе, могут быть фактически учтены в ТММ на III этапе проектирования. В таблице 2 представлены пояснения к определению КИП обоих этапов.

Таблица 2 – 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	+	+

Определение итоговых значений КИП выполнено дифференцированным подходом, при котором каждое из указанных свойств материала характеризуется некоторым коэффициентом учета.

Большая часть вышеупомянутых свойств исследована эмпирически, при проведении экспериментальных исследований, а влияние сварки на ФМХ – теоретически, на основании анализа справочной литературы и научных статей.

В процессе исследования фотодеградации термопластов, были изучены требования Правил РС 2025 года в части нормирования проведения испытаний неметаллических материалов на ультрафиолетовое старение. Выявлено что требования Правил являются некорректными и требуют существенных изменений.

С целью исследования влияния фотодеградации на ФМХ термопластов спроектирована и изготовлена специальная установка, позволяющая проводить облучение материалов ультрафиолетовым излучением с заданными характеристиками плотности мощности и длины волны. В коллективе соавторов подготовлена заявка на получение патента на соответствующее изобретение.

По результатам исследований, установлено существенное влияние фотодеструкции на ФМХ свойства отдельных термопластов, а также сформулированы предложения по изменению Правил РС в части проведения данных испытаний, которые были направлены в РС, получили одобрение и внедрены в Правила с 2026 года.

Полученные значения коэффициентов учета представлены в таблице 3. При расчете также предусмотрен запас на неучтенные факторы, не представленные в таблице 2.

Таблица 3 – Определение КИП II этапа для ПНД ЛЛ и НПВХ ВХЗ

Свойства материала	ПНД ЛЛ	НПВХ ВХЗ
Изотропия	1,00	0,90
Физическая нелинейность	1,00	1,00
Вязкоупругость (ползучесть и релаксация)	0,70*	0,95*
Влияние скорости нагружения на ФМХ	0,80*	0,90*
Влияние фотодеструкции на ФМХ	0,80	0,90
Влияние температуры на ФМХ	0,70*	0,90*
Влияние сварки на ФМХ	0,80	0,80
Неучтенные факторы	0,90	0,90
ИТОГО	0,23	0,45

Коэффициенты, отмеченные «*», при расчете КИП III этапа не учитываются, так как могут быть учтены в ТММ непосредственным образом. В таком случае, КИП III этапа для ПНД ЛЛ предлагается принять равным 0,57, а для НПВХ ВХЗ – 0,58.

КИП II и III этапов для ПНД ЛЛ отличаются более чем в 2 раза, что подчеркивает необходимость выполнения III этапа проектирования ККС. У НПВХ ВХЗ данная разница составляет менее 27%, что говорит о достаточной применимости только II этапа расчета при КИП II этапа, без проведения расчетов с использованием ТММ (III этапа).

Таким образом, предлагаемые КИП представлены в таблице 4.

КИП материала по касательным напряжениям приняты равными 0,58 от КИП по нормальным напряжениям.

Определение допустимых напряжений выполняется перемножением КИП на предел текучести материала на растяжение.

Таблица 4 – Значения предлагаемых КИП

Тип связи	ПНД ЛЛ		НПВХ ХЗ
	II этап	III этап	II этап
Пластины	0,23	0,57	0,45
Балки набора	0,23		0,45
	0,14		0,26

На данном этапе разработки методики, дифференциация КИП по виду нагрузок и типов связей не выполнялась.

Допускаемые перемещения на II этапе проектирования (по предлагаемой методике), принимаются по аналогии с требованиями Правил иностранных КО:

- 1) максимальный прогиб ячейки пластины – не более 2,5% от шпации;
- 2) максимальный прогиб корпуса суда – не более 1/200 длины судна в сечении любого шпангоута.

На III этапе проектирования ККС (по предлагаемой методике), в качестве критерия допускаемых перемещений для ПНД ЛЛ принято максимальное значение скорости ползучести – 0,324 мм/час – при которой ползучесть стабильна и не переходит в стадию резкого увеличения скорости.

Критерий потери устойчивости в работе не рассматривался, и на данном этапе принят равным 1,0.

На основе экспериментальных кривых, полученных в рамках испытаний ПНД ЛЛ, осуществлен подбор коэффициентов определяющих уравнений ТММ. В таблице 5 представлен перечень данных коэффициентов с их численными значениями.

Таблица 5 – Коэффициенты трехсетевой модели ПНД ЛЛ

№ п/п	Обозначение	Размерность	Описание	Значение
1	μ_A	МПа	Модуль сдвига сети А	$257257 \cdot 10^{-3}$
2	$\hat{\tau}_A$	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	$\hat{\tau}_B$	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	$379362 \cdot 10^{-3}$

По результатам подбора коэффициентов ТММ выполнено сопоставление серии экспериментальных («Эк.») и расчетных («Расч.») данных. На рисунках 5-7 представлено сравнение некоторых из них, а именно:

- 1) кривых ползучести – рисунок 5;
- 2) диаграмм растяжения при различных скоростях нагружения – рисунок 6;
- 3) диаграммы сжатия – рисунок 7.

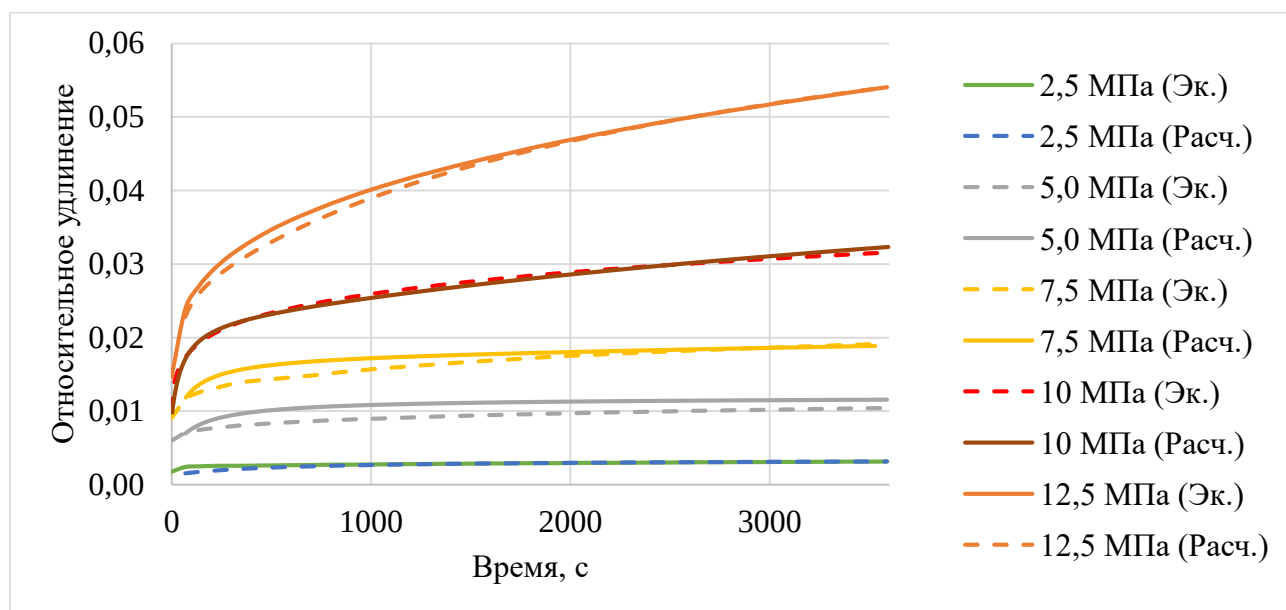


Рисунок 5 – Сравнение экспериментальных и расчетных кривых ползучести

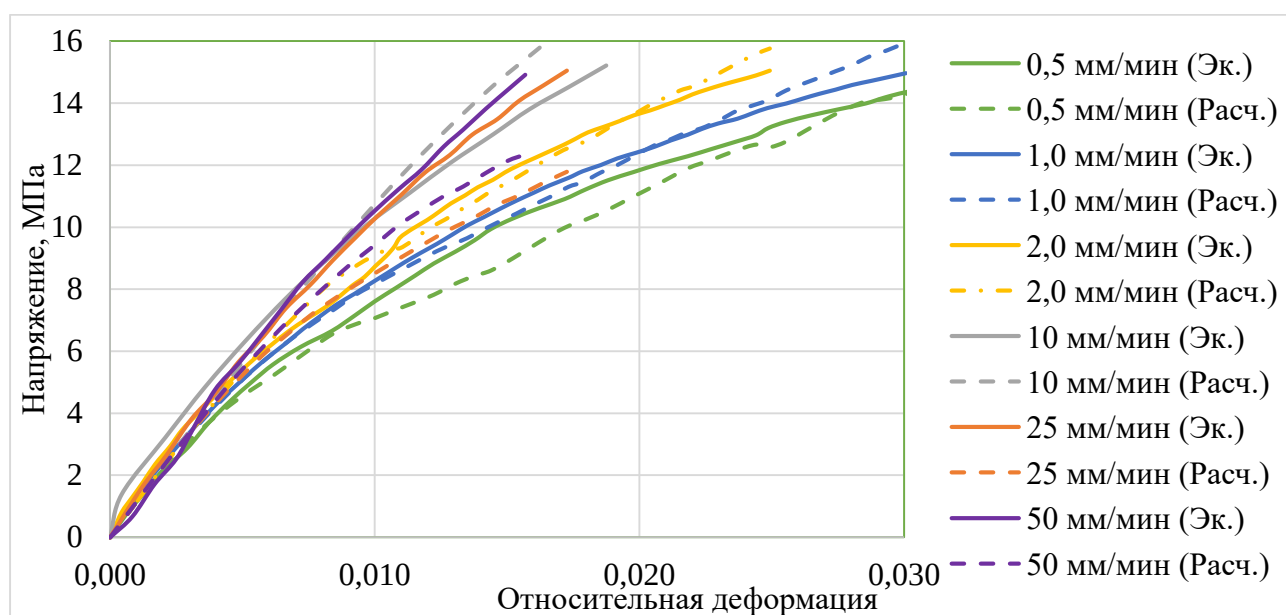


Рисунок 6 – Сравнение экспериментальных и расчетных диаграмм растяжения, полученных при разных скоростях нагружения

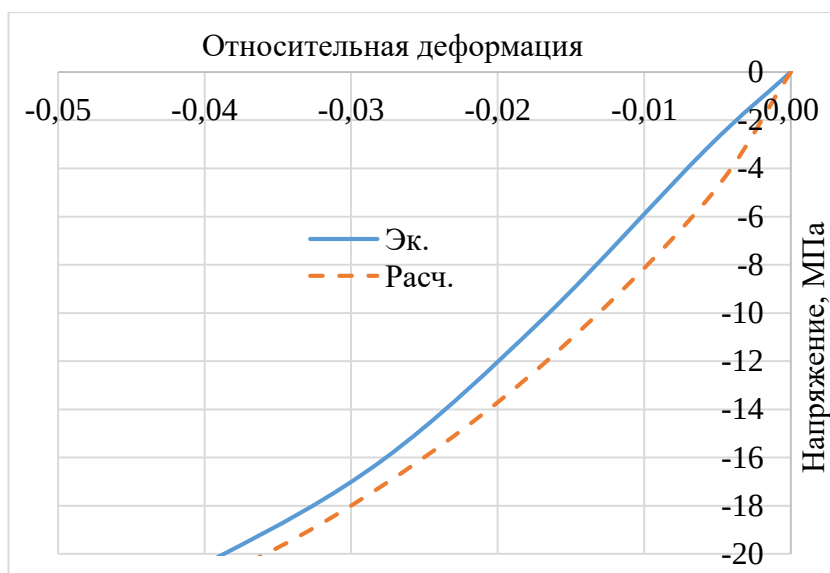


Рисунок 7 – Сравнение экспериментальной и расчетной диаграммы сжатия

Как видно из представленных графиков, ТММ позволяет учитывать вышеперечисленные свойства материала, однако имеется некоторое расхождение в расчетной кривой сжатия (расчетная модель на сжатие обладает повышенной жесткостью).

Данная СКММ может быть использована для выполнения проверочных расчетов прочности конструкций из ПНД, однако рекомендуется проведение цикла дополнительных испытаний с целью ее уточнения.

Ввиду того, что для НПВХ, как было указано выше, проведение расчетов с применением СКММ не требуется, коэффициенты моделей материалы не определялись. Необходимость выполнения расчетов с применением СКММ для прочих термопластов должна быть оценена после проведения серии экспериментальных исследований их ФМХ.

В четвертой главе диссертации представлена демонстрация применения предлагаемой методики проектирования на конструкции корпуса плавучего причала.

Выполнено проектирование трех вариантов конструкций плавучего причала:

- 1) из ПНД ЛЛ по предлагаемой методике – конструкция №1;
- 2) из ПНД ЛЛ по критериям и нормам итальянского КО – конструкция №2;
- 3) из НПВХ ВХЗ по предлагаемой методике – конструкция №3.

Профиль балок набора – полоса. Система набора – монотонная поперечная, холостая.

Корпус понтона разделен 3 поперечными водонепроницаемыми переборками (на 8, 16 и 24 шп.) на 4 блока: блок №1 – 0-8 шп.; блок №2 – 8-16 шп.; блок №3 – 16-24 шп.; блок №4 – 24-32 шп. Конструкция корпуса причала принята одинаковой в рамках блоков № 1 и №4 и блоков № 2 и №3 (симметрично, относительно плоскости мидель-шпангоута).

Расчетный случай:

- внешнее давление – 2 кПа на палубу блоков № 1 и №4; 6 кПа – на палубу блоков №2 и №3.
- собственный вес конструкции;
- равномерно распределенная нагрузка по всей палубе причала от массы уложенного деревянного настила.

Приложенные усилия компенсируются гидростатическим давлением, приложенным к наружной обшивке корпуса по фактическую осадку причала

Этап I. Обоснование и выбор материала. Ввиду того, что НПВХ в качестве ОКМ в настоящее время не используется, требования к минимальным значениям ФМХ еще не разработаны. На данном этапе, с целью демонстрации применения методики, принимается, что НПВХ ВХЗ может быть использован в качестве ОКМ.

Требования к минимальным ФМХ ПНД представлены в таблице 1. Несмотря на то, что для ПНД ЛЛ полный цикл экспериментальных исследований не проводился, часть результатов испытаний, полученных в 3 главе диссертации, позволяет судить о возможности / невозможности применения данного материала в качестве ОКМ:

- предел текучести при растяжении – 19,8 МПа (при пороговом значении – 22 МПа);
- модуль упругости при растяжении – 650 МПа (при пороговом значении – 950 МПа).

Таким образом, ПНД ЛЛ не может быть использован в качестве ОКМ, но, с целью демонстрации предлагаемой методики проектирования, принимается, что материал может быть использован.

Этап II. Предварительное определение размеров связей. 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, согласно требованиям итальянского КО, минимальный момент сопротивления балок набора не должен быть меньше 15 см³.

Расчет размеров связей каждой из 3 конструкций выполнен итеративно, в программном обеспечении (далее – ПО) «Femap with NX Nastran» с применением метода конечных элементов. Итоговые размеры связей для каждой конструкции

представлены в таблице 6. Результаты статического расчета прочности конструкций на II этапе, а также массы конструкций представлены в таблице 7.

По результатам расчета, конструкция №2 получилась легче на 22% по сравнению с конструкцией №1 из того же материала (ПНД). Конструкция №3 из НПВХ ВХЗ получилась легче на 6% чем конструкция №2 и на 27% легче конструкции №1.

Таблица 6 – Результат предварительного выбора размеров связей

Перекрытие	Связь	Размеры связей, мм					
		Блок 1,4			Блок 2,3		
		К.№1	К.№2	К.№3	К.№1	К.№2	К.№3
Палуба	Настил	12	12	8	18	18	12
	Карлингс	90x10	90x10	50x6	90x10	90x10	50x6
	Бимс	180x20	160x16	90x12	270x30	160x16	140x16
Днище	Обшивка	12	12	8	14	14	8
	Шпангоут	230x28	160x16	140x16	240x28	160x16	140x16
	Стрингер	200x24	160x16	80x10	240x28	160x16	10x80
Борт	Обшивка	12	12	8	12	12	8
	Шпангоут	90x10	90x10	50x6	90x10	90x10	50x6
Переборка	Обшивка	14	14	8	14x	14	8
	Стойка	160x18	160x16	50x6	180x20	160x16	80x10

Примечание: «К.№1» - конструкция №1; «К.№2» - конструкция №2; «К.№3» - конструкция №3.

Таблица 7 – Результаты расчетов на II этапе проектирования

Критерий	Конструкция №1		Конструкция №2		Конструкция №3	
	Порог. значение	Факт. значение	Порог. значение	Факт. значение	Порог. значение	Факт. значение
Максимальный прогиб пластины, мм	12,5	9,55	12,5	6,68	12,5	5,67
Максимальный прогиб корпуса, мм	80	73,1	107	71,2	80	29,7
Максимальные напряжения в пластинах, МПа	4,55	4,21	12,3	3,75	19,08	12,4
Максимальные напряжения в балках, МПа	4,55	3,30	10,1	6,92	19,08	17,0
Коэффициент потери устойчивости	1,0	1,46	1,0	1,03	1,0	1,18
Масса, кг	-	4645	-	3602	-	3388

Этап III. Выполнение проверочных расчетов прочности. Расчет выполнен для конструкций № 1 и №2 при использовании ТММ с коэффициентами, представленными в таблице 5. Расчет выполнен в ПО «Ansys».

Расчетный случай: аналогичный описанному ранее за тем исключением, что нагрузки прикладываются в течение 1 секунды, и далее выдерживаются постоянными в течение 86 399 с. Таким образом, физическое время расчета составляет 1 сутки. Температура конструкции – 22°C. На рисунке 8 представлена картина вертикальных перемещений (вдоль оси Z) конструкции №1 в конечный момент времени, а на рисунке 9 – картина напряженного состояния конструкции.

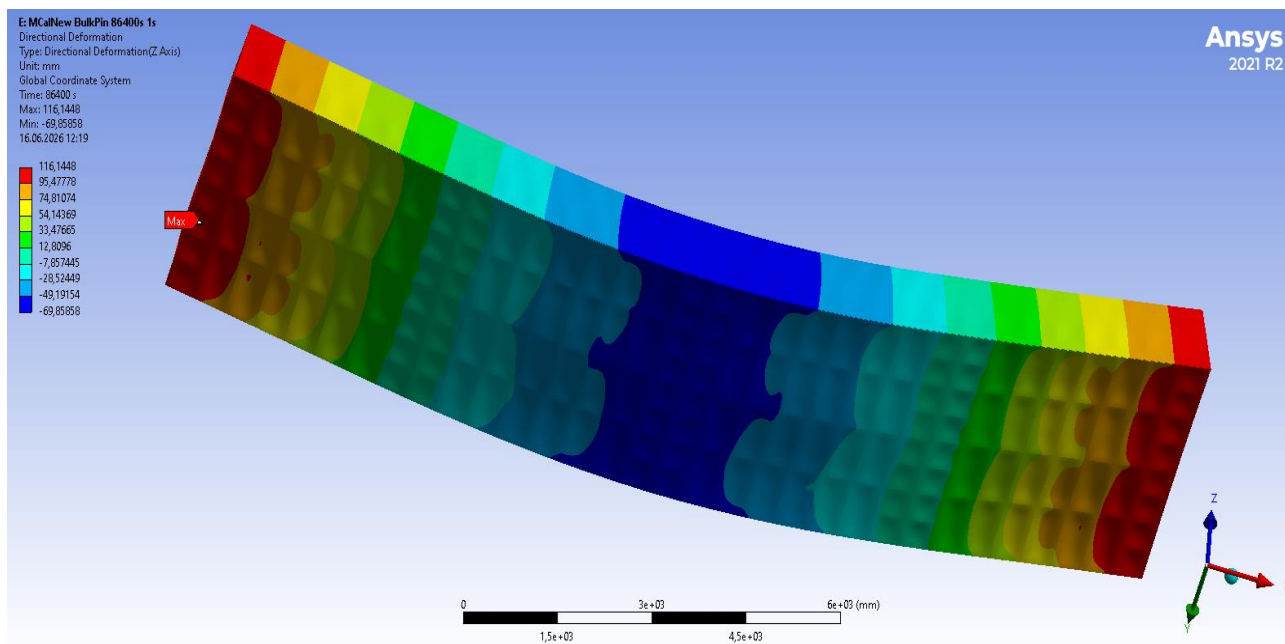


Рисунок 8 – Картина вертикальных перемещений в конструкции №1 в момент времени 86 400 с

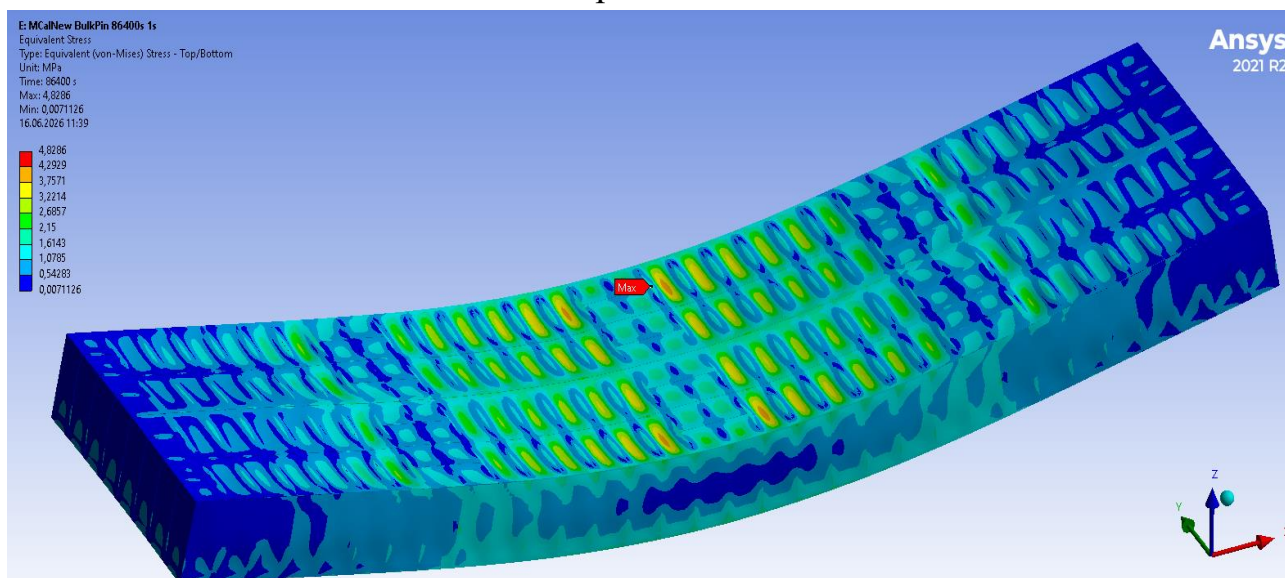


Рисунок 9 – Картина напряженного состояния конструкции №1 в момент времени 86 400 с

На рисунке 10 представлены графики изменения максимальных перемещений (точка на ячейке днищевой обшивки в районе оконечности) от

времени для обеих конструкций. Красными точками отмечены моменты времени, при которых скорость ползучести стремится к постоянному значению (изменение скорости ползучести не превышает 3%).

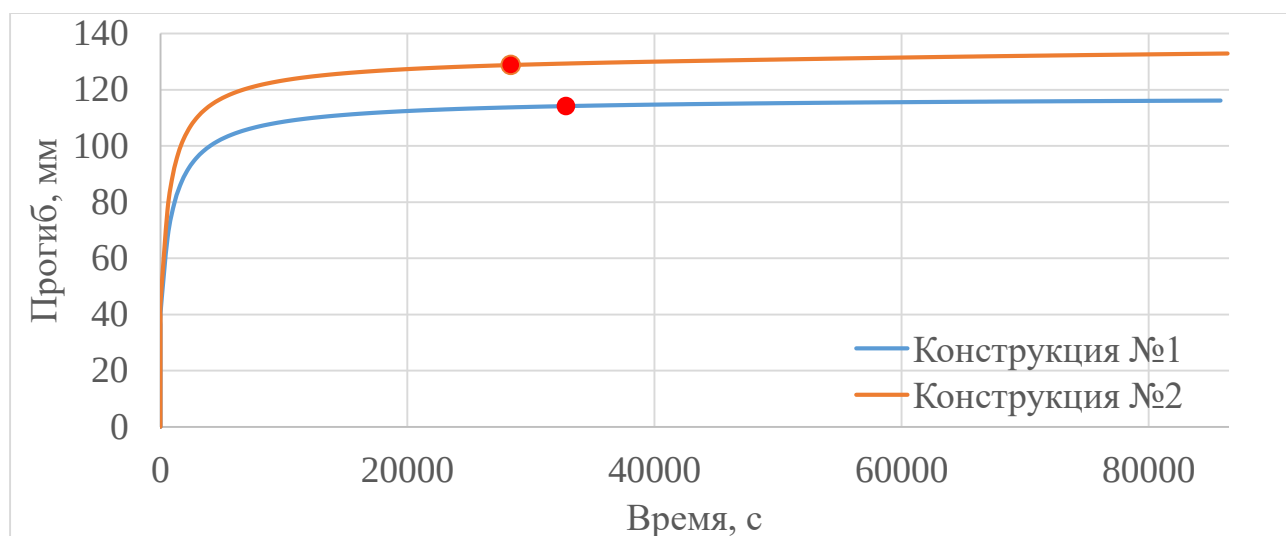


Рисунок 10 – Графики изменения максимальных перемещений от времени

Значение установившейся скорости ползучести у конструкции №1 составляет 0,312 мм/час, у конструкции №2 – 0,468 мм/час, при допуске 0,324 мм/час.

На рисунке 11 представлены графики изменения максимальных напряжений в конструкции от времени.

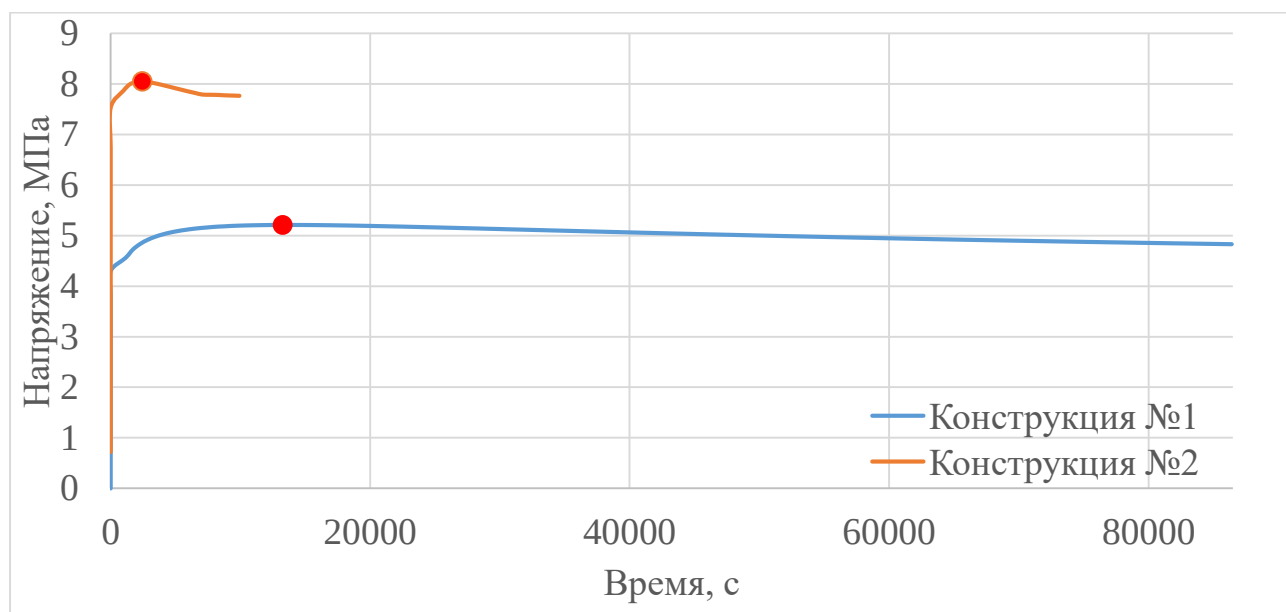


Рисунок 11 – Графики изменения максимальных напряжений в конструкциях от времени

Максимальное значение напряжений в конструкции №1 составило 5,21 МПа (отмечено на графике красной точкой), при допускаемом значении 11,3 МПа. Коэффициент потери устойчивости в конечный момент времени для конструкции №1 – больше 3,0, что превышает значение 1,46, представленное в таблице 7 (полученное на II этапе проектирования). Это может быть обусловлено тем, что расчетная модель материала на сжатие показывает более жесткие характеристики, чем материал проявляет на самом деле (см. рисунок 7), что отражает необходимость уточнения модели материала в последующих исследованиях.

В конструкции №2, менее, чем через 10 800 с (3 ч) наблюдается потеря устойчивости балок набора (см. рисунок 11), что говорит о необходимости усиления конструкции в рассматриваемом расчетном случае. Максимальные напряжения составили 8,04 МПа, при допускаемом значении 10,1 МПа.

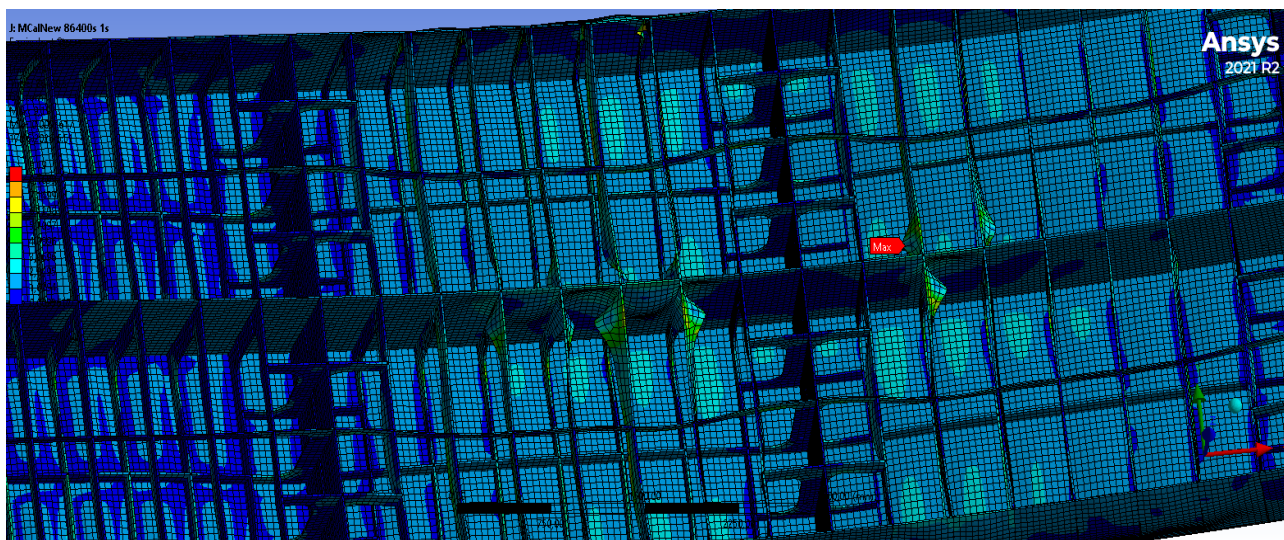


Рисунок 11 – Область конструкции №2 в районе максимальных напряжений и потери устойчивости балок набора

Данный пример наглядно демонстрирует необходимость выполнения III этапа расчетов для конструкций из ПНД, а также возможную целесообразность использования НПВХ в качестве ОКМ.

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 пороговые значения характеристик;

3) разработаны корректировки к требованиям о проведении испытаний неметаллических материалов на ультрафиолетовой старение для Правил РМРС. Результаты работ одобрены и внедрены в 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 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 НТС РМРС «Разработка требований к конструкции и прочности судов малых размерений из полиэтилена низкого давления для включения в Правила РС».

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в текущий перечень ВАК:

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 (автор – 100 %).
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 (автор – 50%).
3. 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 (автор – 50 %).
4. К вопросу об изменении требований Правил РС по проведению испытаний неметаллических материалов на ультрафиолетовое старение / Д. А. Романюта, И. С. Щукин, А. В. Цибулькинова, И. Г. Самусев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2026. – Т. 56, № 2. – С. 120-129 (автор 30%).
5. Исследование зависимости температуры резания от режимов фрезерования полимерных некомпозиционных материалов, применяемых в судостроении / А. Г. Кисель, Д. Б. Подашев, Е. А. Чуреев, Д. А. Романюта // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2025. – № 4. – С. 81-89. – DOI 10.52261/02346206_2025_4_81 (автор 25 %).
6. Романюта, Д. А. К вопросу о расчете жесткой прямоугольной изотропной пластины с жестко закрепленным контуром под действием сосредоточенной нагрузки в центре пластины / Д. А. Романюта, А. С. Ариенчук // Известия КГТУ. – 2025. – № 79. – С. 113-126. – DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-113-126 (автор 50 %).
7. Исследование влияния режимов фрезерования на физико-механические характеристики термопластов для судостроения / А.А. Мушенков, Д.А. Романюта, Е.А. Чуреев, А.Г. Кисель // Транспортное машиностроение. – 2026. – № 9. – С. 50-59. DOI 10.30987/2782-5957-2026-9-50-59 (автор – 30%).

Публикации в других изданиях и материалы конференции:

8. Dependence of Cutting Temperature on Milling Modes of Polymer Noncomposite Materials for Shipbuilding / A. G. Kisel', D. B. Podashev, E. A.

Chureev, D. A. Romanyuta // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2025. – Vol. 54, No. S2. – P. S262-S270. – DOI 10.1134/S1052618825701341 (автор – 25%).

9. Исследование влияния режима фрезерования на предел прочности изделий из жесткого поливинилхлорида / Д. В. Клевцов, Р. А. Фомина, И. Щукин, Д. А. Романюта // Современные научные проблемы и их решение: анализ, моделирование и практическое применение: Сборник статей Международной научно-практической конференции, Иркутск, 17 октября 2025 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2025. – С. 32-36 (автор – 30%).

10. Романюта, Д.А. Особенности расчетов прочности конструкций из полимерных некомпозиционных материалов / Д.А. Романюта // Тезисы докладов всероссийской молодежной конференции «Научно-технологическое развитие судостроения -2025», г. Санкт-Петербург, 23 апреля 2025 года. – С. 58-59 (автор – 100%).

11. Романюта, Д.А. Применение конститутивной модели полиэтилена низкого давления при проектировании судовых конструкций/ Д.А. Романюта // Тезисы докладов всероссийской молодежной конференции «Научно-технологическое развитие судостроения -2026», г. Санкт-Петербург, 23 сентября 2026 года. – С. 63-64 (автор – 100%).