На правах рукописи

КАЗУНИН ИВАН ДМИТРИЕВИЧ

ТЕХНОЛОГИЯ СНИЖЕНИЯ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ ЗАКРЫТЫХ АКВАТОРИЙ ПОРТОВ С ПОМОЩЬЮ ИРРЕГУЛЯРНО ВМОРАЖИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

2.1.6. – Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в Акционерном обществе «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева».

Научный руководитель: **Казунин Дмитрий Владимирович**
доктор технических наук, доцент, директор департамента платформы имитационного моделирования безэкипажного судовождения ООО «Стеор Навигационные системы будущего» (ООО «Стеор НСБ»).

Официальные оппоненты: **Цуприк Владимир Григорьевич**
доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник департамента «Морские арктические технологии», политехнического института (школы) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Дальневосточного федерального университета (ФГАОУ ВО «ДВФУ»).

Шарапов Дмитрий Андреевич
кандидат технических наук, доцент, доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства, инженерно-строительного института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ФГБУ «ААНИИ»)**

Защита состоится «19» декабря 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 72.1.003.01 на базе АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева» по адресу: 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21.

E-mail: ivanovatv@vniig.ru, тел. +7 (812) 535-26-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и на сайте www.vniig.rushydro.ru.

Автореферат разослан «___»_____2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник Т.В. Иванова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Гидротехнические сооружения (ГТС) как постоянные, так и временные, относятся к сооружениям особого назначения и являются объектами повышенной опасности, степень ответственности которых зависит от класса (I-IV). Устойчивое функционирование морских портов является важной задачей при освоении арктического континентального шельфа. Однако в процессе эксплуатации ГТС, их работа значительно осложняется из-за ледовых явлений.

При проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений в Арктических регионах одним из важных условий является учет ледовых нагрузок. В условиях низких температур на поверхности воды возникают ледовые образования, создающие основные проблемы при эксплуатации ГТС. Ледовые образования приводят не только к возникновению собственных ледовых нагрузок, но также участвуют в передаче усилий, возникающих при движении судна вблизи ГТС или же при соударении с внешними ледовыми полями.

Для обеспечения безопасной эксплуатации морских портов с замерзающей акваторией необходимы противоледовые мероприятия в период ледовой навигации. Эти мероприятия включают: разработку систем по поддержанию поверхности воды свободной ото льда путем его разрушения, понижение скорости нарастания льда, управление движением льда и его удаление с защищаемой акватории. Совершенствование этих систем направлено на разработку и применение новых универсальных технологий снижения ледовой нагрузки, позволяющих максимально уменьшить зависимость от внешних климатических условий и индивидуальных конструктивных особенностей ГТС внутри закрытых (защищённых) акваторий портов.

Таким образом, **актуальность работы** обусловлена:

1. Необходимостью повышения надежности гидротехнических сооружений на закрытых акваториях портов РФ, за счет снижения действующих на них ледовых нагрузок;

2. Необходимостью гарантированного функционирования морских арктических портов при отсутствии специализированных судов в их акватории для проведения ледокольных работ с целью обеспечения швартовки грузовых судов.

Степень разработанности

При разработке новой технологии были проанализированы существующие способы по борьбе с обледенением акваторий и по уменьшению ледовых нагрузок (труды Шаталиной И.Н., Пеховича А.И., Алейникова С. М). Современные подходы, предложенные В. В. Богородским, В. П. Гаврило, О. А. Недошивиным, распределялись по 5 группам, в зависимости от воздействия на лед: механические, термические, химические, электрофизические и комбинированные. Особое внимание в работе было уделено наиболее распространенным

способам, таким как: использование ледоколов (механический), барботажные системы (термический), волновое разрушение и проектные решения по избыточному усилению конструкций (механический).

В результате проведённого анализа автором установлено, что на сегодняшний день не существует проектных технологий, которые бы подходили большинству ГТС в северных регионах, были мало зависимы от погодных и температурных условий и обеспечивали устойчивость функционирования морских портов Арктических регионов при отсутствии ледоколов в их акваториях.

Дополнительно к исследованию существующих технологий по борьбе с обледенением акваторий, с целью изучения свойств льда, были проанализированы результаты исследований: Богородского В.В., Винникова С.Д., Гаврило В.П., Готлибо Я.Л., Донченко Р.В., Доронина Ю.П., Ковалева С.М., Козлова Д.В., Цуприка В.Г., Коржавина К.Н., Лебедева Г.А., Назинцева Ю.Л., Недошивина О.А., Панова В.В., Песчанского И.С., Проскурякова Б.В., Соколова И.Н., Сухорукова К.К., Трегуб Г.А., Хейсина Д.Е., Чижова А.Н., Шаталиной И.Н., Пеховича А.И., Алейникова С. М.

Объектом исследования является нагрузка, воздействующая через ледовый покров с иррегулярно вмороженными объектами (ИВО) на вмерзшие в лед гидротехнические сооружения закрытых акваторий портов.

Предметом исследования являются физико-механические свойства перфорированного льда, созданного с помощью иррегулярно вмораживаемых объектов (ИВО), в условиях низких температур.

Область исследования соответствует требованиям паспорта специальности: 2.1.6 – «Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология» (пункты 8, 10, 22):

- методы физического и математического моделирования работы портовых сооружений и сооружений континентального шельфа; прогнозирование расчетных нагрузок и воздействий: ледовых и от судов;

- нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения;

- гидроледотермика природных и искусственных водных объектов, портовых акваторий, бьефов речных гидроузлов; моделирование воздействий льда на гидротехнические сооружения.

Цель диссертационной работы заключается в *снижении* передаваемых через ледовый покров *нагрузок* на гидротехнические сооружения, путем уменьшения прочностных характеристик льда за счет перфорации с помощью предлагаемой технологии с использованием искусственно вмороженных в лед объектов (ИВО). Идея представленной технологии предложена автором совместно с д.т.н., проф. Альхименко Александром Ивановичем.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели в работе поставлены следующие комплексные задачи:

1. Провести анализ существующих технологий по снижению ледовых нагрузок на портовые сооружения с целью выявления их основных недостатков, а также учесть опыт их создания при разработке предлагаемой автором технологии.

2. Провести теоретическую оценку влияния предлагаемой автором технологии на нагрузки, возникающие от внешних источников и передаваемые через ледовый покров на причальную стенку,

3. Провести полевые исследования для экспериментальной оценки изменений прочностных свойств льда с учетом предлагаемой автором технологии.

4. Провести лабораторные исследования на физической модели с целью получения статистических данных по взаимодействию объектов, используемых в предложенной автором технологии снижения ледовой нагрузки на ГТС, с модельным судном и в модельном льду.

5. Провести анализ свойств льда и определить схему моделирования льда с учётом его характеристик при создании математических моделей.

6. Разработать численную модель, предложенной технологии снижения ледовой нагрузки, на основе метода конечных элементов в программном комплексе Abaqus FEA, выполнить сравнение результатов расчета с полученными экспериментальными данными.

7. Разработать методику применения предлагаемой автором технологии снижения ледовой нагрузки на портовые сооружения в реальных условиях.

Научная новизна работы состоит в том, что:

1. Разработана новая технология снижения ледовой нагрузки на портовые сооружения с помощью сквозной перфорации льда, создаваемой с помощью ИВО, что приводит к снижению передаваемых через ледовый покров нагрузок на гидротехнические сооружения.

2. Проведен анализ предлагаемой технологии, включающий теоретическую проработку взаимодействия различных наклонных поверхностей ГТС с чистым льдом и перфорированным льдом, который, по предложению автора, ослабляется с помощью искусственно вмороженных объектов (ИВО). С помощью выполненного анализа получены условия по разрушению льда изгибом, а также получены формулы для оценки снижения нагрузок, передаваемых через лед, на причальную стенку ГТС.

3. На основании сравнения результатов полевых испытаний и теоретического анализа, подтверждена правомерность предложенных автором зависимостей. Автором представлены результаты обработки экспериментальных данных, которые подтвердили ранее сделанное

теоретическое предположение по снижению нагрузок, передаваемых на ГТС через перфорированный лед с помощью ИВО, по сравнению с чистым льдом.

4. Проведен анализ экспериментальных данных, полученных при проведении испытаний в ледовом бассейне ААНИИ, по взаимодействию судна ледового класса с чистым льдом и перфорированным льдом с помощью ИВО. В работе представлена статистическая оценка изменения плотности распределения ИВО по «акватории порта» после проводки судна ледового класса.

5. Разработана численная модель напряженно-деформированного состояния чистого льда и перфорированного льда с помощью ИВО, прошедшая проверку сравнения результатов расчета с полученными экспериментальными данными. После проверки разработанной модели, при тех же параметрах льда и внешних условий, проведены многовариантные расчеты по варьированию параметров ИВО. На основе новых моделей, установлены характеристики ИВО, которые позволят максимально снизить нагрузку, передаваемую на ГТС через лед.

6. Предложена методика определения характеристик ИВО (на базе лабораторных масштабных данных) для использования предлагаемой автором технологии в реальных условиях и снижения нагрузок, передаваемых через ледовый покров на ГТС. Сформулированы ограничения использования ИВО, представлены области применения и основные принципы подбора и эффективной эксплуатации ИВО.

Теоретическая значимость результатов работы

Теоретическая значимость работы заключается в выводе формул для расчета горизонтальных усилий, передаваемых через перфорированное ледовое поле с помощью ИВО на ГТС, и создании численной многослойной модели напряженно-деформированного состояния чистого льда и перфорированного льда с помощью ИВО, включающей параметризацию свойств льда и пригодной для оптимизационных расчетов; а также в преобразовании теоретических формул методом асимптотических эквивалентных в эквивалентные функции для сохранения непрерывности и отсутствия разрыва первой производной в области расчета.

Практическая значимость

1. Разработана новая технология снижения нагрузок, передаваемых через лед, на ГТС, от внешних источников сил, которая может быть применена на закрытых акваториях портов и обеспечивала бы долговечность, устойчивость функционирования морских портов северных регионов без использования ледоколов.

2. В диссертации представлены многочисленные экспериментальные данные по разрушению чистого льда и перфорированного льда с помощью ИВО, которые могут быть использованы в практике исследований и проектирования.

3. В диссертации представлен декомпозиционный подход, примененный для создания численной модели в комплексе Abaqus FEA, который может быть использован для решения других задач, связанных с ГТС, с учетом погодных и технических условий.

4. Предложена методика по использованию ИВО, с целью перфорации льда, в реальных масштабно-климатических условиях. Для этого в работе представлены результаты внедрения в моделирующую среду на базе порта Сабетта, которые могут быть использованы для облегчения реализации технологии перфорации льда в реальных условиях.

Методология и методы исследования

В работе представлены теоретические исследования, экспериментальные исследования в полевых условиях и в ледовом бассейне, а также проведенный в комплексе Abaqus FEA численный эксперимент. В основе *теоретического исследования* лежат методы теоретической механики и термодинамики, учитывающие свойства льда и материалов. В *экспериментальном исследовании* используются методы моделирования, сравнительного анализа, математической статистики. *Численное моделирование* выполнено с использованием программного комплекса Abaqus FEA, в котором расчетные подходы основаны на методе конечных элементов.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием фундаментальных законов физики, общепринятых методов механики деформируемого тела и механики разрушения; использованием проверенного оборудования в аккредитованной лаборатории; корректным использованием результатов других авторов; выполнением обработки результатов статистическими методами; использованием сертифицированных программных комплексов для численного моделирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Новая технология, направленная на уменьшение нагрузки, передаваемой через лед, на ГТС, путем перфорирования льда с помощью ИВО с целью снижения прочностных характеристик ледового покрова.

2. Результаты теоретического анализа с получением расчетных формул для усилий, подтверждающие возможность снижать нагрузку на ГТС с помощью предлагаемой технологии по перфорации льда с использованием ИВО.

3. Результаты экспериментальных исследований - полевых испытаний и физического эксперимента в ледовом бассейне, подтверждающие эффективность предлагаемой технологии снижения передаваемых через лед нагрузок.

4. Результаты анализа характеристик льда и обоснование выбора схемы моделирования льда с ИВО при численных расчетах.

5. Результаты численного моделирования, воспроизводящие условия физического эксперимента, позволяющие обосновать условия максимального снижения передаваемой на ГТС нагрузки.

6. Методика определения параметров ИВО, позволяющие обоснованно подходить к их выбору при реализации предлагаемой технологии для использования в реальных условиях.

Личный вклад автора

1. Решение теоретической задачи по взаимодействию различных наклонных поверхностей ГТС как с чистым льдом, так и перфорированным с помощью ИВО льдом.

2. Разработка программы и проведение полевых испытания клавиш льда с последующим анализом и обобщением полученных результатов.

3. Разработка программы испытаний, участие в проведении испытаний в ледовом бассейне АНИИ с последующим самостоятельным анализом полученных результатов.

4. Проведение анализа свойств льда с обоснованием выбора многослойной модели для описания его поведения, применяемой при разработке численной модели, с выбором и обоснованием формул с учетом граничных условий.

5. Выполнено численное моделирование и проведен анализ нагрузок, передаваемых на ГТС в чистом льду и в перфорированном льду, по предлагаемой технологи.

6. Разработана математическая модель ИВО (как нового объекта), программа и проведены испытаниях ИВО в виртуальной платформе моделирования.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность доктору технических наук, профессору, А.И. Альхименко за введение в специальность, ценные советы, направление на которое обратил внимание; доктору технических наук, доценту Д.В. Казунину за искреннее внимание к работе и советы, высказанные им в процессе проведения исследований. Автор также выражает искреннюю благодарность к.ф.-м.н. доценту С.В. Лупуляк и А. А. Малюгину за советы, помощь и плодотворное сотрудничество.

Апробация результатов исследования

Материалы диссертационной работы докладывались на заседаниях кафедры АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». Отдельные положения диссертации докладывались автором на следующих конференциях и семинарах:

1) Научно-практической конференции с международным участием (неделя науки 2012 года). Инженерно-строительный факультет СПбГПУ. 2)Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference Kona, Big Island, Hawaii, USA, June 21-26, 2015; 3) International Conference On Engineering Sciences And Technologies, 27-29 May 2015, Tatranská Štrba, High Tatras

Mountains - Slovak Republic; 4) XVI научно-техническая конференция ВНИИГ. Гидроэнергетика. Гидротехника. 2024.

Публикации по результатам исследований

Результаты диссертационной работы опубликованы в 3-х изданиях из перечня ВАК; 2-х публикациях в материалах международных конференций и 10 в других изданиях, в том числе патент и свидетельства о регистрации программ.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, шести приложений. Работа изложена на 162 листах, содержит 14 таблиц, 57 рисунков и список литературы из 101 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность темы исследования, степень ее разработанности, научная новизна, практическая и теоретическая значимость, цель и задачи исследования, защищаемые положения, общая характеристика и структура работы.

Первая глава посвящена обзору литературы по теме исследования. На основании проведенного анализа отечественного и мирового опыта по разработке и применению технологий снижения ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения (ГТС) на акваториях портов, выделены наиболее распространенные способы по борьбе с обледенением акваторий. Показаны основные недостатки существующих технологий, оказывающие значительное влияние на риск возникновения аварий, в результате которых нарушается работа сооружений северных портов. Выполнена постановка задачи исследования по разработке новой технологии снижения нагрузок, с целью повышения долговечности и устойчивого функционирования морских портов Арктических регионов.

Во второй главе дается описание предлагаемой технологии, которая заключается в перфорации льда, с помощью иррегулярно вмораживаемых объектов (ИВО), размещенных на закрытых акваториях портов. Приведены результаты теоретического анализа, показывающие степень снижения горизонтальных усилий, передаваемых от внешних источников на ГТС.

Основная идея предлагаемой технологии заключается в уменьшении прочностных характеристик льда за счет перфорации, выполненной с помощью искусственно вмороженных в лед объектов (ИВО), заполняющих поверхность навигационной акватории, которую предстоит защищать от замерзания. Располагаясь вплотную, друг к другу, ИВО образуют ослабленный отверстиями (перфорирование), демпфирующий ледовый покров и термическое «одеяло» (Рисунок 1). Использование ИВО при замерзании акватории будет нарушать целостность

ледового поля, создавая узлы концентрации напряжений и, тем самым уменьшать передаваемую через лед нагрузку.

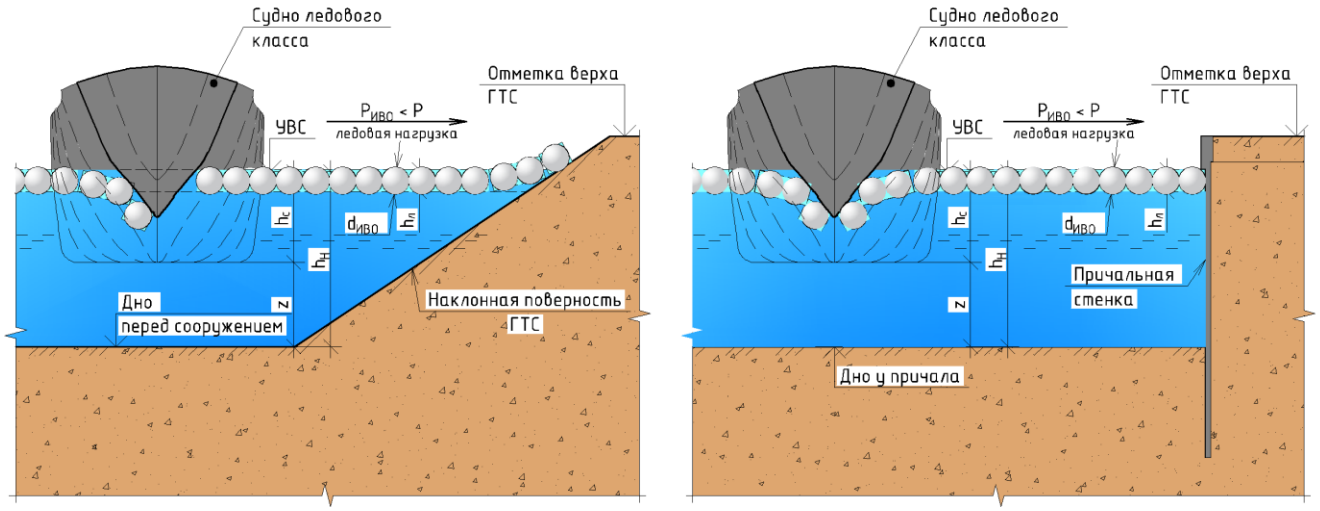


Рисунок 1. Схема механического разрушения ледового покрова

Для определения передаваемых через лед нагрузок на ГТС, возникающих в результате действия внешних источников сил, проведен теоретический анализ взаимодействия с ледовым полем поверхностей ГТС разного наклона. По мнению автора, в закрытых акваториях портов, ***механическое разрушение ледового покрова возможно*** в области стыка наклонной причальной стенки со льдом, или ***в области контакта наклонной поверхности судна со льдом*** (рис. 1) в зависимости от того, какое предельное состояние наступит раньше. В работе рассматривается разрушение льда изгибом. В результате проведенного анализа были определены теоретические условия для решения поставленной в главе 1 задачи:

1. Необходимо, чтобы *угол наклона поверхности сооружения* обеспечивал изгиб льда для его ломки, а не приводил к разрушению льда сжатием при его контакте с ГТС.

2. Необходимо, чтобы *сумма изгибающих моментов*, созданных приложенными силами при контакте льда с ГТС, превышала прочность сечения льда на изгиб, чтобы обеспечить его разрушение.

3. Необходимо, чтобы были обеспечены *условия скольжения/вращения* статически изогнутого льда с целью обеспечения окончательного разрушения его изгибом.

Для оценки условий ломки льда при контакте с наклонной поверхностью ГТС, автор использовал методику, разработанную группой авторов Каштелян В.И., Рывлин А.Я., Фаддеев О.В., Ягодкин В.Я., в основе которой лежит набор квазистационарных состояний нагрузок до наступления разрушения льда изгибом, границы которого определяются используемыми материалами.

В ходе проведенных исследований было использовано соотношение между углом

наклона стенки ГТС и коэффициентом трения на контакте льда с сооружением, обеспечивающее начало изгиба льда:

$$\beta < a\mathrm{ctg}\left(\mu_k\right), \tag{1}$$

где μ_k – коэффициент трения на контакте.

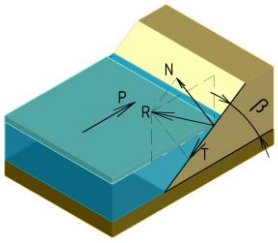
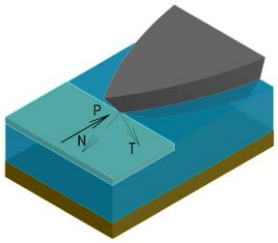
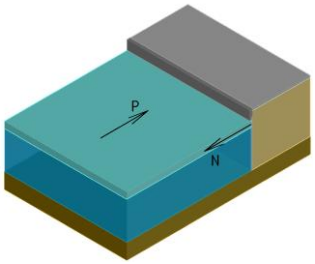
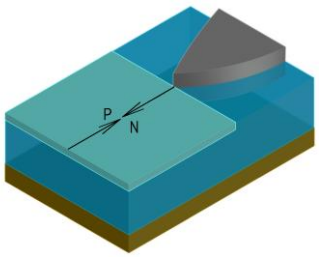
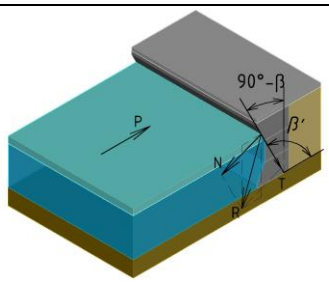
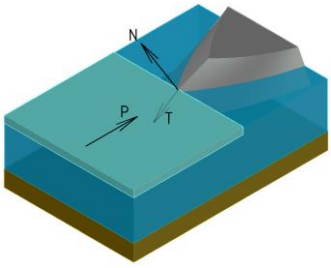
I) Остро-наклонная поверхность (поверхность┼)	изгиб вверх	разрез льда с изгибом вверх
		
II) Вертикальная поверхность (поверхность┴)	сжатие	разрез
		
III) Тупо-наклонная поверхность (поверхность─)	изгиб вниз	разрез льда с изгибом вниз
		

Рисунок 2. Схемы модели взаимодействия льда с ГТС.

Для бетона получены допустимые диапазоны углов наклона $\beta < 86,0°...82,0°$ и $\beta' > 94,0°...98,0°$.

Для оценки условий превышения предела прочности сечения льда на изгиб, использована формула по определению горизонтального усилия *P*, позволяющая получить минимальное необходимое значение горизонтальной нагрузки, необходимое для начала разрушения льда изгибом:

$$P \geq \frac{k \cdot \sigma_{изг\ л} \cdot h_л^{\,2} \cdot \left(\mathrm{ctg}\left(\beta\right) \cdot \mu_k + 1\right)}{\left(\mathrm{ctg}\left(\beta\right) - \mu_k\right)}, \tag{2}$$

где k – коэф. пропорциональности; $h_л$ – толщина льда; $\sigma_{изг\ л}$ - предел прочности льда на изгиб.

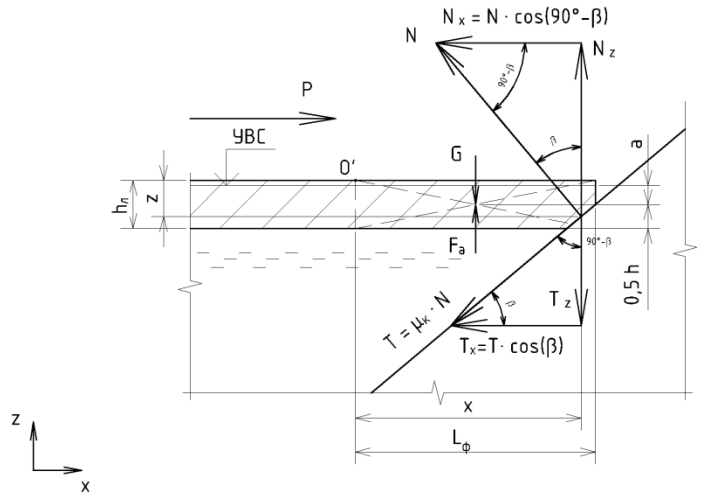
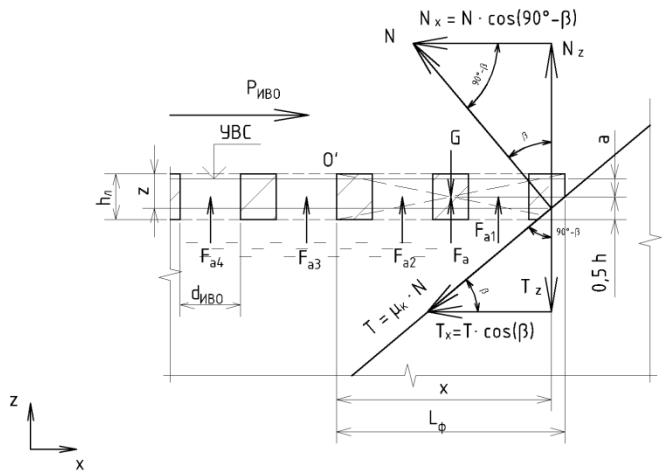
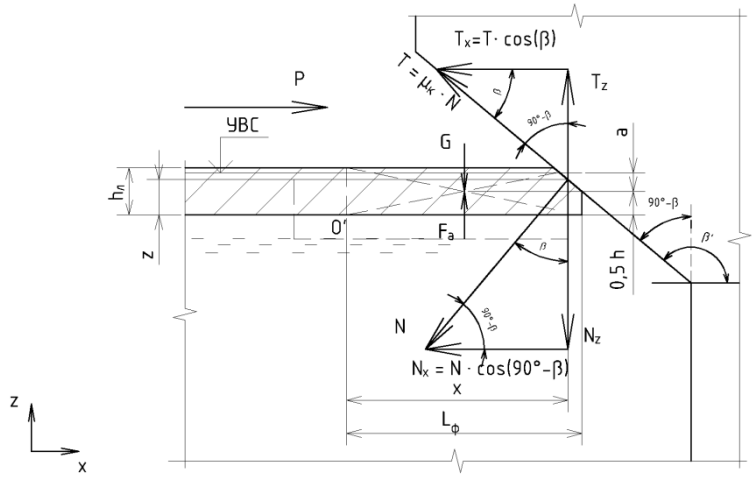
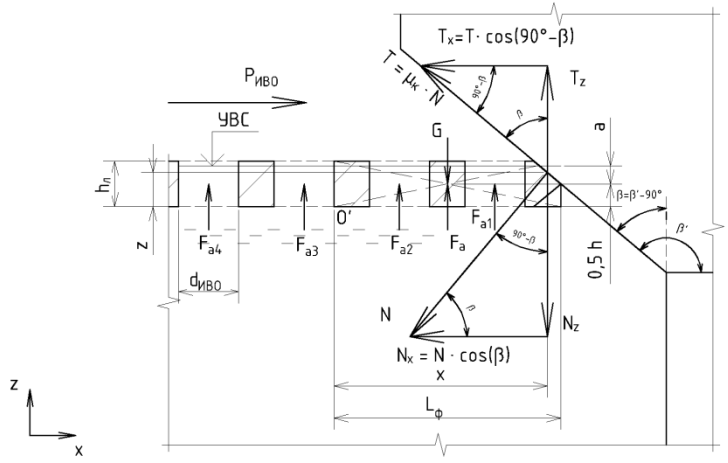
Вариант А-1. Сплошной лед с остро-наклонной поверхностью	Вариант Б-1. Лед с ИВО с остро-наклонной поверхностью
	
Вариант А-2. Сплошной лед с тупо-наклонной поверхностью	Вариант Б-2. Лед с ИВО с тупо-наклонной поверхностью
	

Рисунок 3. Схемы взаимодействия сплошного льда и льда с ИВО с остро- и тупо- наклонными поверхностями ГТС.

Определены условия скольжения и вращения фрагмента сплошного льда, в которых учитывались свойства льда, а также его геометрические параметры, приведенные к одному погонному метру длины фронта контакта.

Получено соотношение между передаваемыми усилиями через сплошной лед (P) и перфорированный лед с помощью ИВО ($P_{ИВО}$) на ГТС, при разрушении льда изгибом и условии, что излом льда происходит на одинаковом расстоянии x (рисунок 3):

$$\frac{P_{ИВО}}{P} \geq 0,215 + \frac{k_{Ad} \cdot 0,785 \cdot \left(\rho_{ИВО} \cdot h_{ИВО} - \rho_{в} \cdot h_{n\,ИВО} \right)}{(\rho_{л} \cdot h_{л} - \rho_{в} \cdot h_{n\,л})}, \quad (3)$$

где $\rho_{л}$ - плотность льда; $h_{л}$ - толщина льда; $\rho_{в}$ - плотность воды; h_{n} - положение в воде (погруженная часть), $\rho_{ИВО}$ - плотность материала ИВО; $h_{ИВО}$ - высота ИВО; k_{Ad} - безразмерный коэффициент адгезии ИВО, варьируемый в диапазоне от 0 до 1.

Как частный случай, проанализирована зависимость (3), в которой $\rho_{ИВО} \approx \rho_{л}$, $h_{ИВО} \approx h_{л}$:

$$\frac{P_{ИВО}}{P} \geq 0,215 + 0,785 \cdot k_{Ad}\,. \quad (4)$$

Проведенные теоретические исследования позволили сделать заключение о том, что предложенная технология перфорации льда может снизить передаваемую через лед нагрузку на ГТС в ~4-5 раз путем снижения прочностных характеристик льда за счет создания перфорации льда с помощью ИВО и уменьшения момента сопротивления сечения льда, определяемого формулой

$$W_{y\,ИВО} = \frac{B_{л} h_{л}^{\,2}}{6} - \left(1 - k_{Ad}\right) \cdot n \cdot W_{ИВО}\,. \quad (5)$$

где $W_{y\,ИВО}$ – момент сопротивления сечения льда с ИВО; $W_{ИВО}$ - момент сопротивления сечения одного элемента ИВО; n – количество ИВО в сечении, приходящихся на ширину $B_{л}$.

В предложенной технологии, большое значение имеет корректный выбор свойств материала ИВО: плавучесть, коэффициент адгезии.

Для подтверждения сделанных в главе 2 выводов, проведены полевые и расчетные исследованиями, представленные в главах 3-5 диссертации.

В третьей главе содержится описание и результаты полевых испытаний и исследований в ледовом бассейне клавиш льда, которые подтвердили теоретические выводы главы 2. По результатам полевого эксперимента был выполнен сравнительный анализ с теоретическими решениями, сформулирована база для выбора расчетных коэффициентов аналитической и численной моделей, а также получены экспериментальные данные для последующего

сравнения с результатами расчета. На базе лабораторного эксперимента, выполненного в ААНИИ, проведен статистический анализ распределения плотности расположения ИВО на поверхности акватории после проводки судна через поле льда с ИВО.

Разработана методика проведения полевого эксперимента, по результатам которой на выбранном участке были сформированы три типа клавиш льда длиной до 1,72 м (из чистого льда, из перфорированного льда с помощью ИВО½ (погруженными на половину в воду и с коэффициентом адгезии k_{Ad} = 1) и льда с ИВО⅔ (погруженными на ⅔ в воду и с коэффициентом адгезии $k_{Ad} \to 0$)), а также клавиши чистого льда до 7м (для демонстрации того, что длинная балка ломается не в заделке).

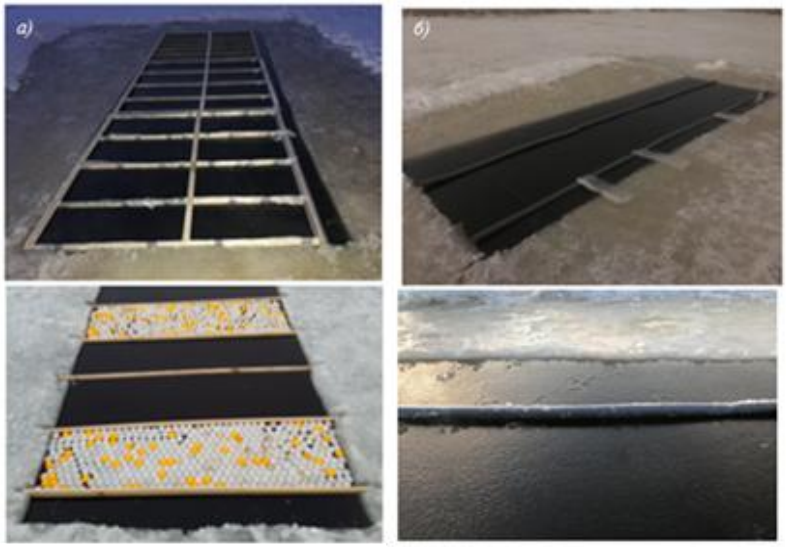


Рисунок 4. Испытательный полигон прямоугольной формы, вырезанный во льду:
а – испытание клавиш длиной до 1,72 м;
б – испытание клавиш длиной до 7 м

Полученные результаты полевых испытаний были проанализированы и обработаны методом наименьших квадратов и представлены в виде зависимостей:

$$M_y = (a \pm \Delta_{1M})\,y + (b \pm \Delta_{2M}),\ \ N_z = (a \pm \Delta_{1N})\,y + (b \pm \Delta_{2N}); \qquad (6)$$

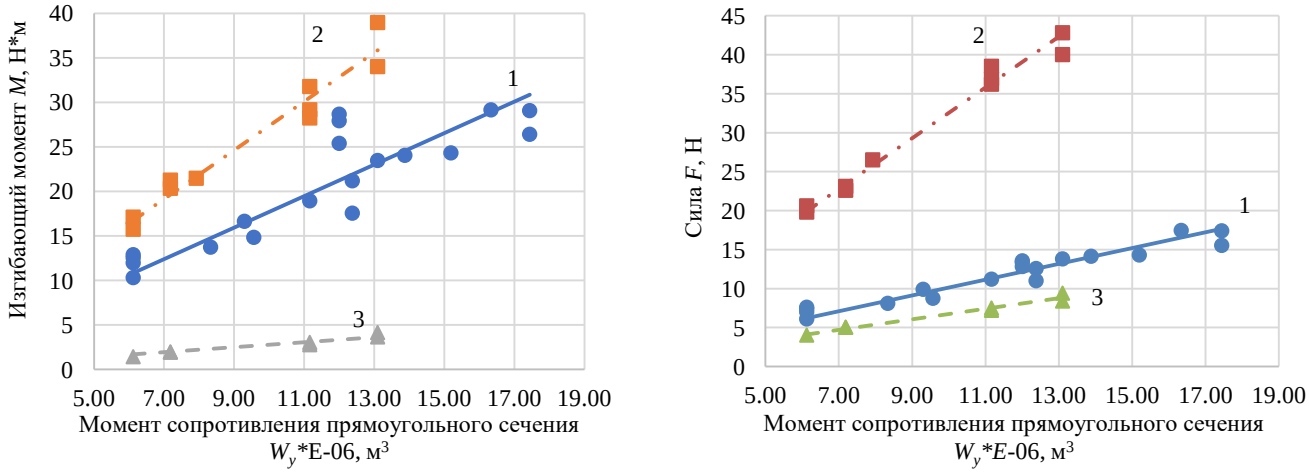


Рисунок 5. Графики зависимости изгибающего момента М (а) и силы F (б) от момента сопротивления сечения Wy: 1 – данные для клавиш чистого льда; 2 – данные для клавиш льда с ИВО½; 3 – данные для клавиш льда с ИВО⅔

По результатам полевого экспериментального исследования удалось оценить влияние предлагаемой технологии на передаваемое на причальные сооружения внешнее усилие,

созданное ледовым полем или возникающее при передаче нагрузок, а именно: перфорация льда с использованием ИВО½ (с k_{Ad} = 1) приводила к увеличению прочности льда в ≈1,55 раза и росту прикладываемой вертикальной силы в ≈3,2 раза; *перфорация льда с использованием* ***ИВО⅔*** (с $k_{Ad} \rightarrow 0$) *приводила к* ***снижению*** *прочности льда* в ≈6,3 раза и ***уменьшению*** *прикладываемой вертикальной силы* в ≈1,5 раза. Полученные экспериментальные данные в дальнейшем были использованы для построения численной модели, представленной в главе 5.

Для оценки изменения плотности концентрации ИВО на защищаемой акватории в ледовом бассейне ААНИИ был проведен сравнительный физический эксперимент по движению модели корпуса судна ледового класса через поле чистого льда и льда с ИВО. Были смоделированы последовательно расположенные на акватории две зоны с различной концентрацией вмороженных в лед ИВО (высокой (участок 2) и низкой (участок 3)).

переход от участка 2 к участку 1 (лед) переход от участка 3 к участку 2

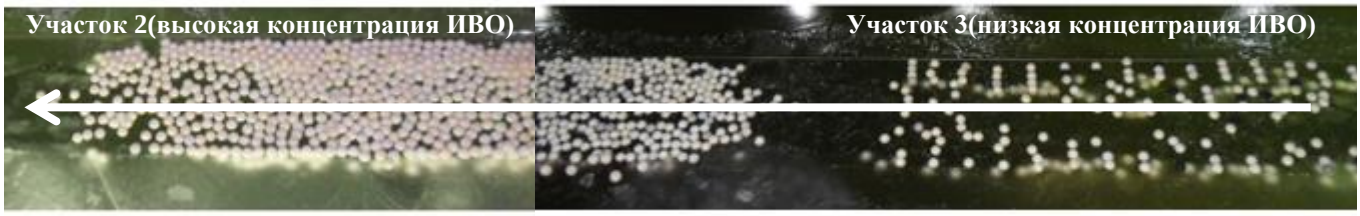


Рисунок 6. Расположение ИВО после первой проводки судна (движение судна справа налево)

переход от участка 1 (лед) к участку 2 переход от участка 2 к участку 3

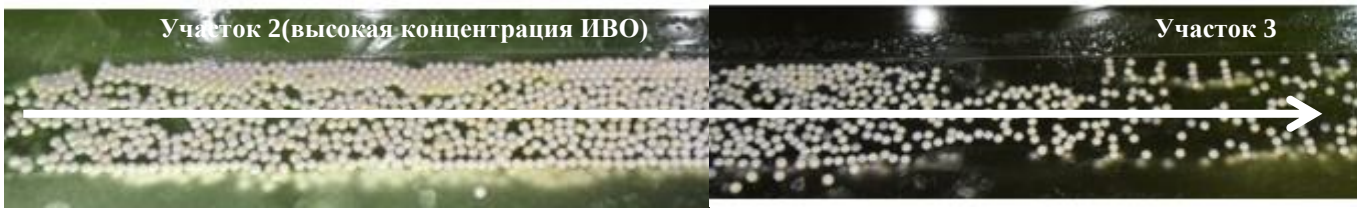


Рисунок 7. Расположение ИВО после второй проводки судна (движение судна слева направо)

Статистический анализ результатов и использованием t-критерия Стьюдента, показал, что при движении судна через поле льда с ИВО не происходит существенного выноса и перераспределения ИВО, защищающих ГТС. В результате первой проводки судна через неразрушенный лед изменение в плотности шариков составило 0,3%, а при второй проводке судна через уже битый лед - 0,5%.

В четвертой главе выполнен анализ открытых источников по свойствам веществ и материалов, учитываемых при обосновании предложенной технологии. На основании анализа многих источников, была определена схема моделирования ледового покрытия, использована система зависимостей, описывающих основные характеристики и поведение льда, вариативно пригодные для использования в вычислительных пакетах.

Была определена модель льда как материала, состоящего из четырех слоев, для каждого из которых, в зависимости от средней температуры слоя, рассчитываются его характеристики.

График зависимости плотности морского льда от его солености s и температуры $T_л$

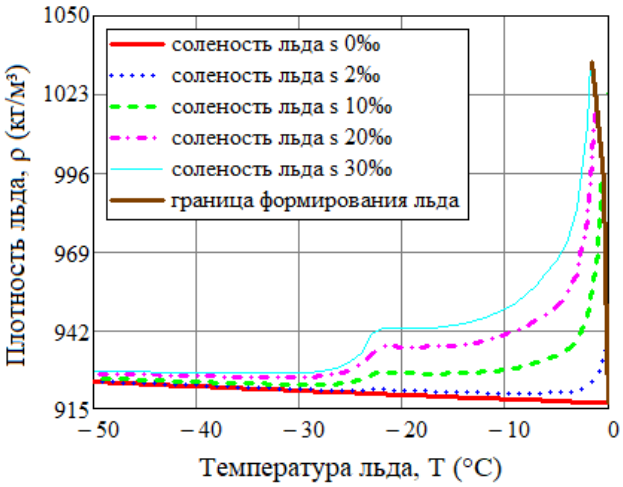
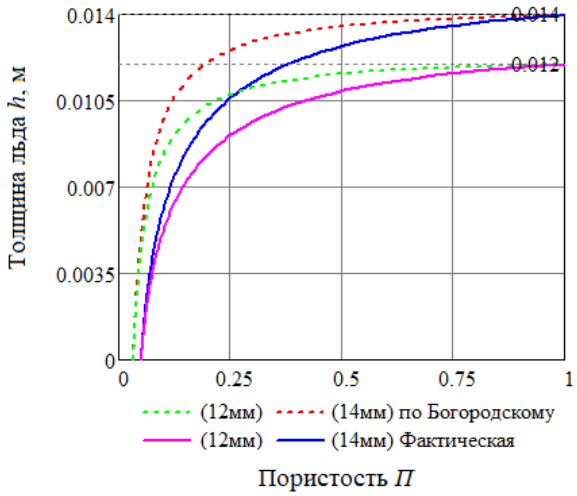


График пористости льда по толщине



Композитный 4х-слойный материал

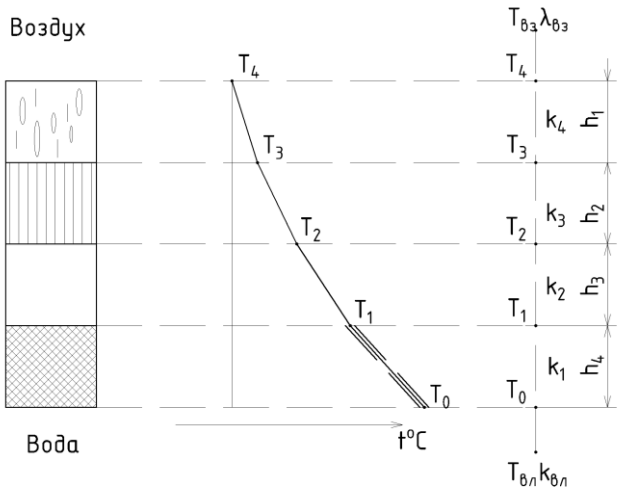


График модуля упругости в зависимости от пористости и температуры

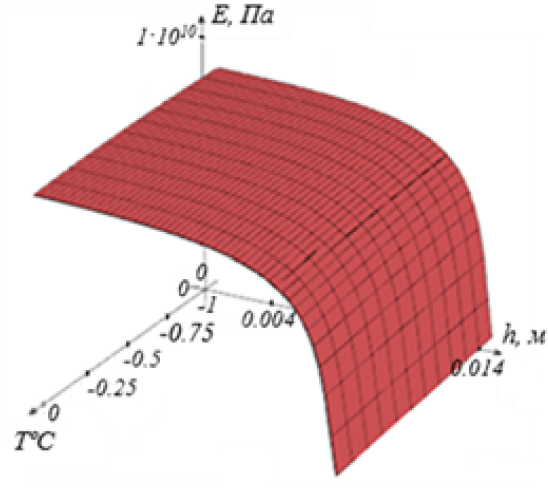


Рисунок 8. Графики параметров льда, для 4х-слойной модели льда

На рисунке 8 представлены результаты анализа исследований по свойствам веществ и материалов таким как: температура воздуха, льда и воды, а также характеристики льда (плотность, пористость), используемых в расчетной модели, описывающей напряженно-деформируемое состояние исследованных в эксперименте клавиш льда.10^{10}

В пятой главе представлена численная модель многослойного чистого льда и льда с ИВО, построенная для решения задачи по выбору геометрических параметров и осадки ИВО, с целью обеспечения оптимальных условий перфорации льда для различных эксплуатационных условий, а также приведены результаты ее настройки и работы с использованием результатов полевых экспериментальных данных главы 3. Даются рекомендации по определению параметров ИВО с учетом эксплуатационных особенностей и характеристик акваторий портов

и их судов. Представлены результаты внедрения предлагаемой технологии в моделирующую среду для условий порта Сабетта в устье р. Обь

В основу создания численной модели по изгибу клавиши льда, покоящейся на воде, была положена модель Винклера - пластины на упругом основании, защемленной одним концом. Упругое основание задавалось набором равномерно присоединенных к поверхности клавиши нелинейных пружин, суммарная жесткость которых определяется силой Архимеда, действующей на клавишу льда и на ИВО. Модель создана в программном комплексе Abaqus FEA.

Для упрощения реализации композитной структуры клавиши льда, ИВО принимаются абсолютно твердыми телами. Таким образом, влияние ИВО на несущую способность клавиши учитывается с помощью уменьшения объема льда и изменения жесткости упругого основания.

В ходе проверки численной модели, по полученным экспериментальным данным сравнивались две величины: экспериментальное расстояние от головы клавиши до линии слома с расчетным расстоянием. Положение расчетной линии слома определялось через максимальную концентрацию напряжений, которая возникала при изгибе клавиши. Среднее отклонение экспериментальной линии слома от расчетной не превышало 2%.

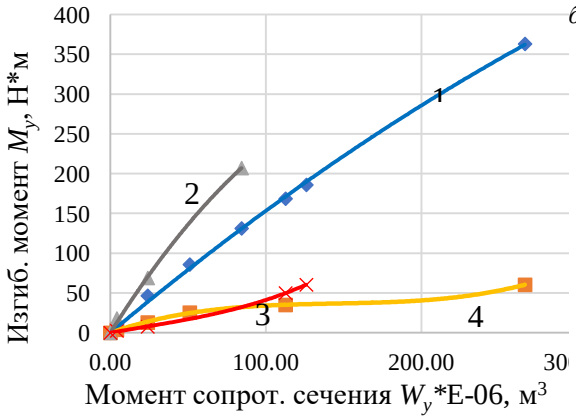
На основе разработанной численной модели была проведена оценка влияния изменения геометрических параметров и осадки ИВО с целью поиска оптимальных вариантов. В результате расчетов были рассмотрены следующие варианты ИВО (с учетом погруженности шариков в воду на ½; на ⅔; на ⅞):

- чистая клавиша льда (расчет №1)
- клавиша льда с ИВО½ (*) $d_{ИВО}$ = 40 мм, с коэффициентом адгезии = 1 (расчет №2)
- клавиша льда с ИВО⅔ (**) $d_{ИВО}$ = 40 мм, с коэффициентом адгезии → 0(расчет №3)
- клавиша льда с ИВО⅞ (***) $d_{ИВО}$ = 40 мм, с коэффициентом адгезии → 0 (расчет №4)

Ширина в расчете была принята равной одному метру для упрощения стандартизации нагрузки (на 1 п.м). Конечная толщина льда определялась по максимально возможному вмораживанию ИВО в лед.

Результаты расчета приведены в графической форме (Рисунок 9).

а)



б)

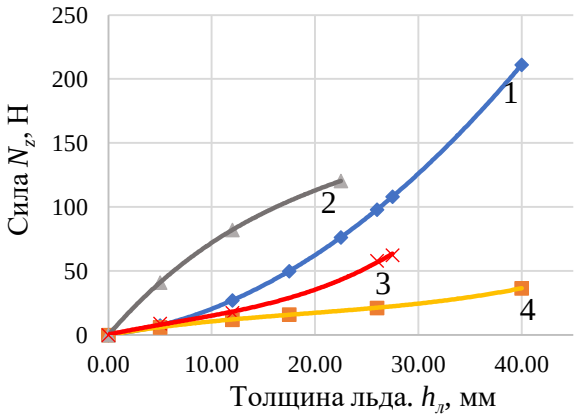


Рисунок 9. Графики зависимости изгибающего момента M (*а*) и силы F (*б*) от момента сопротивления сечения W_y:
1 – данные для клавиш чистого льда;
2 – данные для клавиш льда с ИВО½ $d_{ИВО}$ = 40 мм с коэффициентом адгезии = 1;
3 – данные для клавиш льда с ИВО⅔ $d_{ИВО}$ = 40 мм с коэффициентом адгезии → 0;
4 – данные для клавиш льда с ИВО⅞ $d_{ИВО}$ = 40 мм с коэффициентом адгезии → 0

Результаты расчетов, показали, что наилучшим образом себя показал вариант льда с ИВО по расчетному случаю №4. В этом варианте получено уменьшение прочности льда на изгиб в 5,6 раза, а вертикальной силы в 4,4 раза.

На основе полученных в ходе исследований результатов сформулированы ограничения использования ИВО, области применения и определены основные принципы подбора и эффективной эксплуатации ИВО для текущего технического состояния предлагаемой технологии: как свободно плавающих объектов, так и якорения их отдельных рядов.

Определение диаметра шарообразного элемента ИВО имеет линейную зависимость от толщины ледового покрова акватории, которую необходимо защитить:

$$d_{ИВО} = 1.2 \cdot h_л \tag{7}$$

Плотность материала шарика $\rho_{ИВО}$, для обеспечения необходимого погружения и положения его в ледовом покрове, определяется в зависимости от плотности воды акватории $\rho_в$ (с учетом солености) и его расчетного положения в воде $h_{п\,ИВО}$ (например, 5/6) и рассчитывается по формуле:

$$\rho_{ИВО} = h_{п\,ИВО}{}^2 \cdot \rho_в \cdot \left(3 - 2 \cdot h_{п\,ИВО}\right) \tag{8}$$

Расчет глубины морских каналов, фарватеров и зон маневрирования $d_{н,}$ с учетом применения новой технологии, выполняется согласно СП 444.1326000 по формуле:

$$h_н \geq h_c + \Delta h + z_1 + z_2 + z_3 + z_0 \tag{9}$$

В случае применения на акватории предлагаемой технологии, коэффициенты z_2, z_3, z_0 остаются без изменений. Для коэффициента $z_{1,}$ по нормам, дополнительно вводится поправка на увеличение осадки судна при обледенении, равная 0,1 м при расчетных судах водоизмещением

не более 20 тыс. т. Ввиду того, что плотность ИВО близка к плотности льда, как и диаметр к толщине, при свободном движении судна дополнительных ограничений не требуется.

Схематично область применения предлагаемой технологии можно представить в графическом виде (рисунок 10).

1. 2.

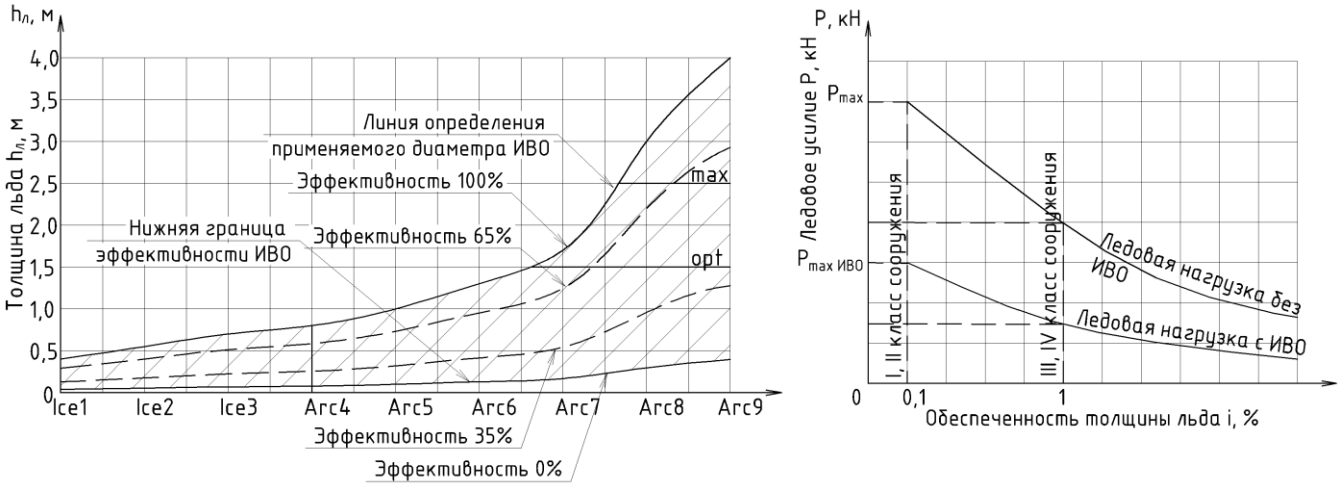
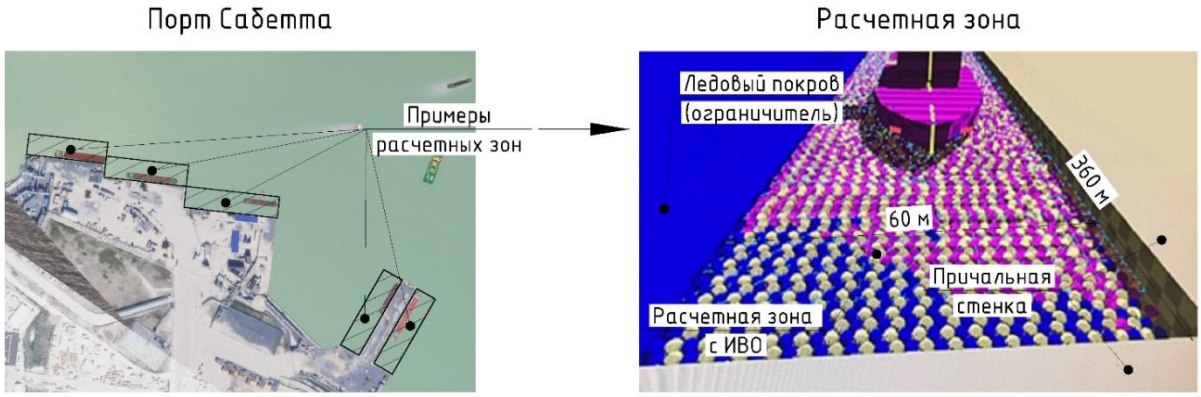


Рисунок 10. 1. График области применения ИВО в зависимости от категории судна

2. График сравнения расчетного ледового усилия без ИВО с расчетным ледовым усилием с ИВО

Касательно самих эксплуатируемых судов в зоне предполагаемой защиты с помощью ИВО, сохраняются ограничения по минимальным техническим характеристикам судов при движении в ледовом поле, согласно нормам НД 2-020101-072 «Правила классификации и постройки морских судов. Том 1».

Для оценки решений автора в ООО «СТЕОР-НСБ» был предоставлен программно-аппаратный комплекс, ориентированный на проведение проверки цифрового оборудования морских судов и береговой инфраструктуры, для которых в виртуальном пространстве создается цифровой образ событий, происходящих в акватории выбранного порта. Для проведения исследований в качестве объект выбран порт Сабетта.



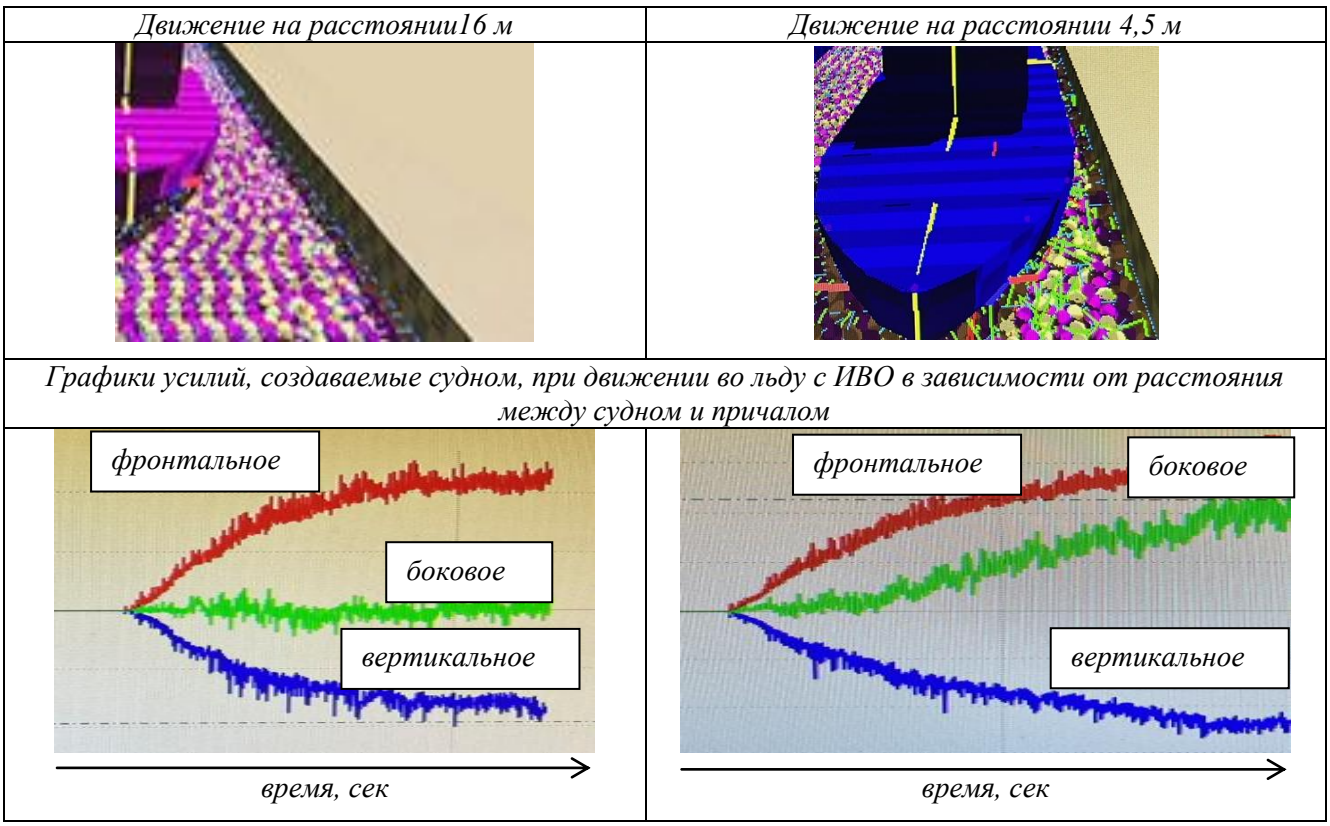


Рисунок 11. Результаты моделирования предлагаемой технологии в моделирующей среде

Таблица 1

Результаты обработки передаваемых усилий на ГТС

Расстояние до причала, м	Отношение $P/P_{ИВО}$ на основании теории	Отношение $P/P_{ИВО}$ на основании численной модели	Отношение $P/P_{ИВО}$ на основании моделирующей среды
16 м	4,65	3,91	3,65
4,5 м			3,23

В результате проведенного исследования: получена оценка по взаимодействию ИВО с ГТС на разном удалении, а также проанализирована возможность движения судна через поле свободно плавающих ИВО, с целью проверки механизма их “расталкивания” и отсутствия попадания ИВО под винт судна; выполнена проверка отсутствия выноса ИВО за пределы защитных сооружений после прохода судна; выполнена проверка воздействия погодных условий на поле ИВО в наиболее важный для их эксплуатации период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований в диссертации получены новые результаты учитывающие перфорацию льда с целью снижения его прочности и сделаны выводы по возможности ее применения в качестве технологии снижения передаваемых через ледовый покров нагрузок на гидротехнические сооружения, путем уменьшения прочностных характеристик льда за счет перфорации с помощью ИВО:

1. На основе исследования видов ледовых воздействий на ГТС, выделены наиболее характерные для закрытых акваторий портов, на которые направлена предлагаемая технология, а именно *демпфирование нагрузки, передаваемой через лед на ГТС* от внешних источников сил; снижение *влияния ледового воротника*.

2. Проведена теоретическая оценка влияния предлагаемой технологии на нагрузки, возникающие от внешних источников и передаваемые через ледовый покров:

- определены конструкции ГТС с наклонными стенками в закрытых акваториях портов, на которые направлена технология, с учетом возможного разрушения льда изгибом;
- получены расчетные зависимости, определяющие предельные углы наклона поверхности и минимальные горизонтальные усилия (при выбранном угле наклона поверхности), при которых возможно выполнение первичных условий разрушения льда изгибом (надлом и вывод из равновесия);
- получены формулы для определения условий полного разрушения льда изгибом (вращение или притапливание/подъем). Полученные зависимости прошли проверку на соответствие единиц измерения и показана их применимость к оценочным расчетам;
- полученные теоретические зависимости, показывают возможность снижать передаваемую нагрузку на ГТС с помощью предлагаемой автором технологии снижения прочности ледового поля с использованием ИВО для перфорации льда при коэффициенте адгезии стремящимся к нулю, более чем в четыре раза.

3. Проведены полевые исследования для экспериментальной оценки изменения прочностных свойств перфорированного льда с учетом предлагаемой автором технологии:

- выполнен анализ существующих нормативных методик, по экспериментальной оценке, прочностных свойств льда. Автором выбрана одна из наиболее подходящая методик, а именно разрушение клавиш льда на воде, с жесткой заделкой на конце; которая учитывает плавучесть льда и ИВО, а также коэффициент адгезии;
- по результатам полевого экспериментального исследования выполнена оценка влияния предлагаемой технологии на нагрузки, передаваемые через ледовый покров, возникающие от внешних источников.

4. Выполнен анализ свойств льда и определена схема моделирования льда как четырёхслойного материала с учётом его свойств:

- определены и преобразованы зависимости, используемые для дальнейшего построения численной модели и проведения оптимизационных расчетов;
- обоснована модель льда, состоящая из четырех слоев, для каждого из которых, в зависимости от средней температуры слоя, рассчитываются характеристики льда.

5. Разработана численная модель на основе метода конечных элементов с применением полученных экспериментальных данных:

- разработана численная конечно-элементная модель клавиш чистого льда и льда с ИВО и выполнено ее сравнение результатов расчета с полученными экспериментальными данными;
- с помощью численной модели установлены новые геометрические значения ИВО и их положение в воде, которые приводят к значительному снижению передаваемых через лед нагрузок на ГТС в более чем 3,9 раза;
- показано влияние материала и свойств ИВО, с учетом плавучести и коэффициента адгезии, на перфорацию с целью снижении прочности льда.

6. Разработана методика применения предлагаемой автором технологии снижения передаваемых через ледовый покров нагрузок на гидротехнические сооружения, путем уменьшения прочностных характеристик льда за счет перфорации льда в реальных условиях:

- разработаны зависимости по определению физических (плотность) и геометрических характеристик ИВО для создания перфорации льда в реальных условиях;
- на основе полученных в ходе исследований результатов автором сформулированы ограничения использования ИВО, области применения и основные принципы подбора и эффективной эксплуатации ИВО;
- реализация предложенной автором технологии в моделирующей среде ПМБС «Маринет» позволила получить данные по взаимодействию перфорированного с помощью ИВО льда с причальной стенкой ГТС, которые подтверждают снижение передаваемой нагрузки через лед с ИВО на ГТС в более чем 3,2 раза.

Основная цель работы достигнута – предлагаемая технология позволяет снизить передаваемые через ледовый покров нагрузки на гидротехнические сооружения, путем снижения прочностных характеристик льда за счет создания перфорации и нарушении целостности льда.

Как показывает исследование, использование иррегулярно расположенных, полупогруженных, шарообразных, искусственно вмороженных объектов (ИВО), при правильно выбранных форме и свойствах материала обеспечивает всесезонную перфорацию ледового

покрова, и как следствие обеспечивает значительное снижение прочностных характеристик льда и, как следствие, снижение передаваемых через лед нагрузок, вызванных внешними источниками.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

Результаты работ и предложенную автором новую технологию снижения передаваемых через ледовый покров нагрузок на гидротехнические сооружения, путем уменьшения прочностных характеристик льда за счет перфорации с помощью с помощью ИВО, рекомендуется применять для закрытых акваторий портов, с целью снижения передаваемых через лед нагрузок на причальную стенку ГТС.

Дальнейшее совершенствование технологии: возможно по пути применения технологии в открытых акваториях и ослабления ледового покрова на подходных каналах; исследование вопроса влияния ИВО на прочность льда при сжатии.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Казунин И.Д. Экспериментальные исследования распределения искусственно вмороженных объектов, защищающих гидротехнические сооружения, при движении судов в закрытых акваториях арктических портов // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2022. Т. 303. С. 85–94.

2. Казунин И.Д. Экспериментальные исследования прочности на изгиб сплошного льда и льда с искусственно вмороженными объектами, снижающими нагрузки на гидротехнические сооружения // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2022. Т. 303. С 72–85.

3. Казунин И.Д., Казунин Д.В. Численное моделирование прочности льда с искусственно вмороженными объектами // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2025. Т. 317.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science:

4. Alhimenko A.I., Kazunin I.D., Nikolaevskiy M.U. A Method of Ice Field Reduction in Port Sabetta Water Area // The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference: Proceedings Papers. 2015. P. 1875–1878.

5. Alhimenko A.I., Kazunin I.D., Nikolaevskiy M.U. The method of ice field strength reduction in port Sabetta on Yamal peninsula // Proceedings of the International Conference on Engineering Sciences and Technologies. 2015. P. 281–286.

Публикации в других изданиях:

6. Рыбин В.В., Тимофеев О.Я., Казунин И.Д. Российская ледовая информационная система (ЛИС) — залог успешного освоения Арктики // Морской вестник. 2016. №4. С. 63–67.

7. Белентев А.В., Головко В.И., Казунин И.Д. Тренажер газового терминала LCHS 6000 Gas (ТГТ) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011612008 от 05.03.2011 г.

8. Белентев А.В., Соколов А.Н., Казунин И.Д. и др. Тренажер грузобалластных операций на сухогрузных судах LCHS 6000 Dry Gargo (ТГОСС) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011612009 от 05.03.2011 г.

9. Васильев А.А., Рыбий В.В., Казунин И.Д. и др. Система управления ледовой обстановкой // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613501, от 21.03.2017 г.

10. Соколов А.Н., Хвастунов А.П., Казунин И.Д. и др RTM «Технологическая платформа» (RTM ТП) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616397 от 17.08.2011 г.

11. Белентев А.В., Головко В.И., Казунин И.Д. и др. Способ создания изображений трехмерных объектов для системы реального времени // Патент на изобретение № 2467395, Дата начала отсчета действия патента: 11.07.2011 г.

12. Белентев А.В., Головко В.И., Казунин И.Д. и др Тренажер морских нефтедобывающих платформ // Патент на полезную модель № 104359 от 10.05.2011 г.

13. Соколов А.Н., Хвастунов А.П., Казунин И.Д. и др Программный комплекс тренажера «Подводный добычной комплекс газоконденсатного месторождения» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614766, от 21.05.2013 г.

14. Соколов А.Н., Хвастунов А.П., Казунин И.Д. и др RTM объекта «Подводный добычной комплекс» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012660765 от 28.11.2012 г.

15. Соколов А.Н., Смирнов Р.И., Казунин И.Д. и др RTM объекта «Подводный трубопровод» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012660766 от 28.11.2012 г.