Акционерное общество
«Всероссийский научно-исследовательский институт
гидротехники имени Б.Е. Веденеева»

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
Д. В. Казунин

Санкт-Петербург
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Условные обозначения 4

Введение 8

Глава 1. Анализ технологий снижения прочности льда при сближении судов ледового класса с гидротехническими сооружениями 18

1.1. Проблемы защиты арктических портов от ледовых образований 19

1.1.1. Нагрузки, возникающие в результате вмерзания сооружения в лед (статическое давление) 23

1.1.2. Нагрузки, возникающие в результате движения льда (динамическое давление льда) 23

1.2. Анализ существующих технологий разрушения льда 24

1.2.1. Механическое разрушение льда ледоколами 25

1.2.2. Термическое разрушение льда барботажем 27

1.2.3. Краткий обзор других технологий 30

1.3. Анализ технологий по усилению конструкций ГТС 31

1.4. Концепция выбора технологии снижения прочности ледового поля с использованием искусственно вмороженных объектов 37

Выводы по Главе 1 40

Глава 2. Снижение передаваемых через лед нагрузок на ГТС с помощью ИВО. обоснование выбора конструкции 41

2.1. Концепция новой технологии снижения прочности ледового поля с использованием искусственно вмороженных объектов 41

2.2. Теоретическое обоснование снижения передаваемых через лед усилий на ГТС с помощью ИВО 45

Выводы по Главе 2 62

Глава 3. Экспериментальная проверка ледовых нагрузок сплошного льда и перфорированного льда с помощью иво на гидротехнические сооружения при швартовке судов ледового класса 63

3.1. Экспериментальные исследования прочности клавиш сплошного льда и льда с ИВО 64

3.1.1. Цели и задачи полевого эксперимента 64

3.1.2. Проведение полевого эксперимента 67

3.1.3. Результаты обработки экспериментальных данных 72

3.2. Экспериментальное исследование распределения ИВО после прохождения судов ледового класса 77

3.2.1. Цели и задачи лабораторного эксперимента 77
3.2.2. Проведение лабораторного эксперимента 78
3.2.3. Результаты обработки лабораторных экспериментальных данных .. 84
Выводы по Главе 3 86
Глава 4. Анализ свойств моделируемого льда 87
4.1. Механические свойства льда 88
4.1.1. Плотность льда 89
4.1.2. Пористость льда 94
4.1.3. Коэффициент Пуассона 95
4.1.4. Модуль упругости 96
4.2. Модель льда и определение температуры 100
Выводы по Главе 4 104
Глава 5. Разработка и апробация численной модели предлагаемой технологии снижения прочности ледового поля с использованием искусственно вмороженных объектов 105
5.1. Описание расчетной модели в программном комплексе Abaqus FEA 106
5.2. Описание используемого расчетного метода и особенности его применения для решения поставленных задач 107
5.3. Тестовые расчеты численной модели и сравнение с экспериментальными данными 112
5.4. Расчетные исследования по снижению усилий на основе численной модели 115
5.5. Использование предлагаемой технологии в натурную величину 120
5.6. Исследование возможности использования предлагаемой технологии . 123
5.7. Исследование возможности использования предлагаемой технологии снижения нагрузки, передаваемой через лед на ГТС 127
Выводы по Главе 5 136
Заключение 138
Список литературы 142
Приложение 1. Акты внедрения 152
Приложение 2 Обоснование возможности использования безразмерного коэффициента адгезии k_{Ad} в исследовательских работах 154
Приложение 3. Описание моделирующей среды 156
Приложение 4. Экономическое сравнение 161

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2*°С)

λ – теплопроводность, Вт/(м*°С)

d – диаметр, м

h – толщина, высота, глубина, м

Q – тепловой поток (Дж/с)

Qr – термическое сопротивление (°С/Вт)

C – удельная теплоемкость, Дж/(кг*°С)

A – площадь, м^2

g – ускорение свободного падения, м/с^2

n - число элементов на участке

ρ – плотность материала/вещества, кг/м^3

k - коэффициент

x, y, z – прямоугольные пространственные координаты, м

β – угол наклона поверхности ГТС, град

P – ледовое, Н

F – сила, Н

M – момент вращения, Н*м

N – сила реакции, Н

T – сила трения, Н

R – результирующая сила силы трения и реакции, Н

G - сила тяжести, Н

M_B - результирующая сила сил тяжести и Архимеда, Н

μ_k - статический коэффициент трения льда о поверхность

μ_{dk} - динамический коэффициент трения льда о поверхность

$\mu_{dл}$ - динамический коэффициент трения льда о лед

σ - прочностная характеристика материала, Па

w - перемещение, м

D - цилиндрическая жесткость пластины, Н*м

W – момент сопротивления сечения, м^3

I – момент инерции сечения, м^4

μ_n - величина, обратная коэффициенту Пуассона

v – коэффициент Пуассона

r – радиус, м

B – ширина образца, м

L – длина, м

a, b, c - коэффициенты

υ - скорость, м/с

MSE – среднеквадратическая ошибка

MA - среднее арифметическое значение

MSD – среднеквадратическое отклонение

γ - число степеней свободы

p – уровень значимости

t – статистический критерий значимости (критерий Стьюдента)

E – модуль упругости, Па

E_d – модуль деформации, Па

τ – время, с

T – температура, °С

s – солёность, ‰

V – объем, м^3

m – масса, кг

Pa – давление, Па

$П$ - пористость

Nu - критерий Нуссельта

Pr- критерий Прандтля

Re - критерий Рейнольда

Ra - критерий Рэлея

ИНДЕКСЫ

ИВО – искусственно вмороженные объекты

Ad - безразмерный коэффициент адгезии материала (приложение 2)

изг – изгиб

сж – сжатие

л – льда

мл – морской лед

пл – пресный лед

ж – жидкость

с - соль

сн -снег

в – вода

вз - воздух

п – погруженная часть

а – Архимед

ф – фрагмент льда

+ - остро- наклонная поверхность

- - тупо- наклонная поверхность

н – натурное значение

м – масштабное значение

кр – предельный (критический)

р – рассол

0л – идеальный (чистый) лед

0, 1, 2…n – численные обозначения

ср – среднее значение

Ц – цилиндр

min, max – минимальное, максимальное значения

с – судно

Н – акватория

СОКРАЩЕНИЯ

ФЦП РГМТ - Федеральная целевая программа «Развития гражданской морской техники»

ИВО – искусственно вмороженные объекты

ГТС – гидротехническое сооружение

МАГИ - международная ассоциации гидравлических исследований

ПМБС – платформа имитационного моделирования без экипажного судовождения

ВВЕДЕНИЕ

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). В условиях активной борьбы за арктический шельф на арктическом континентальном шельфе Российской Федерации, который простирается на 200 морских миль (или до границы подводной окраины материка) и включает в себя дно и недра подводных районов, ведется активная разведка и разработка естественных месторождений. Интенсивная добыча полезных ископаемых (например, нефти и газа) побуждает к развертыванию добывающих платформ, устройству портов и причалов для обслуживания транспортных судов, переброски оборудования и т.д.

Устойчивое функционирование морских портов является важной задачей при освоении арктического континентального шельфа. Однако в процессе эксплуатации ГТС, по различным причинам (антропогенным или природным) нарушается работа сооружения.

При проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) 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.

Борьба с обледенением акваторий портов приводит к разработке систем по поддержанию поверхности воды свободной ото льда путем его разрушения, понижения скорости нарастания льда, управления движением льда и его удаления 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.

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 его акватории для проведения ледокольных работ с целью обеспечения швартовки грузовых судов.

Степень разработанности

При разработке новой технологии были проанализированы существующие способы по борьбе (в том числе труды Шаталиной И.Н., Пехович А.И., Алейников С. М) с обледенением акваторий и по уменьшению ледовых нагрузок. 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., Доронин Ю.П., Ковалева С.М., Козлова Д.В., 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., Пехович А.И., Алейников С. М.

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

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

Область исследования соответствует требованиям паспорта специальности ВАК: 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, 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. Алхименко 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 д.т.н., проф. О.А. Муравьеву, д.т.н., проф. А.С. Большеву, к.ф.-м.н. доцент С.В. Лупуляк, к.т.н. Т.В. Иванова, д.т.н. Д.В. Козлову, д.т.н. В.Г. Цуприк, 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 36 изданиях: 16 печатных работ, в числе которых 5 работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных в Перечне ВАК; 10 свидетельств о регистрации программ; 2 публикации в материалах международных конференций и 10 - в других изданиях.

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.

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. Выделены основные недостатки существующих технологий, оказывающие значительное влияние на риск

возникновения аварий, в результате которых нарушается работа сооружения 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 суть идеи, которой, заключается в перфорации льда, с помощью иррегулярно вмораживаемых объектов (ИВО), которые размещаются на закрытых акваториях портов. Приведены результаты теоретического анализа, показывающего степень снижения горизонтальных усилий, передаваемых от внешних источников на ГТС.

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 выводами, сформулирована база для проведения выбора расчетных коэффициентов математической 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 ИВО на акватории после проводки судна.

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, составлены формулы, описывающие основные характеристики и поведение льда.

В пятой главе приведены результаты численного моделирования физического эксперимента. С использованием полевых экспериментальных данных разработана модель чистого льда и перфорированного льда с помощью ИВО. В главе также раскрываются вопросы 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ СНИЖЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА ПРИ СБЛИЖЕНИИ СУДОВ ЛЕДОВОГО КЛАССА С ГИДРОТЕХНИЧЕСКИМИ СООРУЖЕНИЯМИ

В настоящее время ряд стран ведет интенсивное освоение континентального арктического шельфа с целью использования запасов углеводородного сырья, добываемых на подводных месторождениях. Повышение объёмов добычи нефти и газа, а также увеличение грузооборота отражаются и на работе водных транспортных путей (таких как северный морской путь), что создает необходимость разворачивать крупные порты на северном побережье РФ.

Одна из ключевых особенностей строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений в северных регионах – учет воздействия льда на причальные сооружения. Определение основных элементов конструкции сооружения напрямую зависит от воздействия льда и ледовых нагрузок.

При проектировании гидротехнических сооружений (далее – ГТС) расчет ледовых нагрузок определяется на основе нормативных документов, при этом одним из основных является СП38.13330 [7]. Но помимо проверенных временем решений, отраженных в нормативных документах в работах исследователей [1], [2], [3], [4], [5], [6] рекомендуется применять усовершенствованные и новые технические решения, которые в конечном итоге усиливают, но и существенно увеличивают стоимость конструкций ГТС.

На сегодняшний день в порту применяются три основные технологии для снижения ледовых нагрузок на ГТС, которые и будут рассмотрены в данной главе:

- объемное разрушение ледового покрова акватории порта (с помощью ледоколов или термического воздействия);

- локальное усиление конструкций ГТС и прежде всего причальных сооружений;

- ослабление ледового покрова порта, которое, по мнению автора настоящего диссертационного исследования, является наиболее эффективной технологией по снижению ледового воздействия на ГТС для закрытых акваторий.

Основные результаты данной главы изложены в работах автора (см. список литературы [8], [9], [10], [11]).

1.1. Проблемы защиты арктических портов от ледовых образований

Сейчас в мире эксплуатируется более 660 морских причалов, которые были введены в эксплуатацию или прошли существенную модернизацию в основном с середины семидесятых по конец восьмидесятых годов XX века и из которых 12 % находятся в северных регионах [10], но при этом их большая часть – за пределами РФ.

Наличие больших запасов природных ресурсов, необходимость обслуживания объектов месторождений и удаленных арктических областей РФ (ввоз топлива, оборудования, продовольствия, вывоз леса, природных ископаемых) приводят к увеличению грузооборота северного морского пути и способствуют расширению существующих морских портов и строительству новых в районах стока крупных рек Сибири. Согласно исследованиям [12], в настоящее время наибольший грузооборот в северном регионе обеспечивают порты Мурманск, *Сабетта*, Архангельск, Дудинка, Беренговой, которые ***находятся в закрытых акваториях*** и которые не подвержены типичным для открытого моря воздействиям. При этом только *Сабетта* является новым портом.

При проектировании и строительстве гидротехнических сооружений в условиях Крайнего Севера, где во время эксплуатации ГТС подвергаются воздействию льда, необходимо учитывать ледовые нагрузки при расчетных ледовых условиях, полученные на основе исходных данных по ледовой обстановке в районе сооружений (СП58.13330), с учетом типов судов, которые могут заходить в порты. Согласно докладу М. Н. Григорьева «Тренды развития

судоходства на Севморпути в 2023 году и ожидания 2024 года» [13], для северных портов и северного морского пути специалистами ААНИИ определены (см. рис. 1.1) временные интервалы и типы арктических судов класса, которые работают в Арктике: для порта Сабетта (5 регион) для судов высокого ледового класса возможна круглогодичная навигация. А следовательно, возрастает актуальность защиты ГТС.

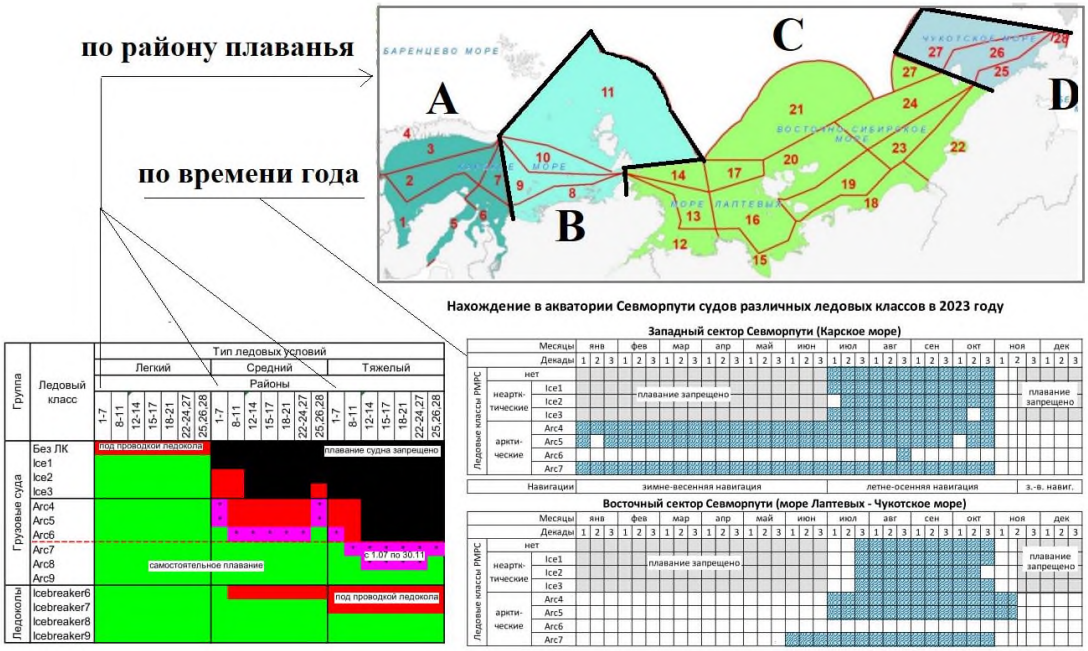
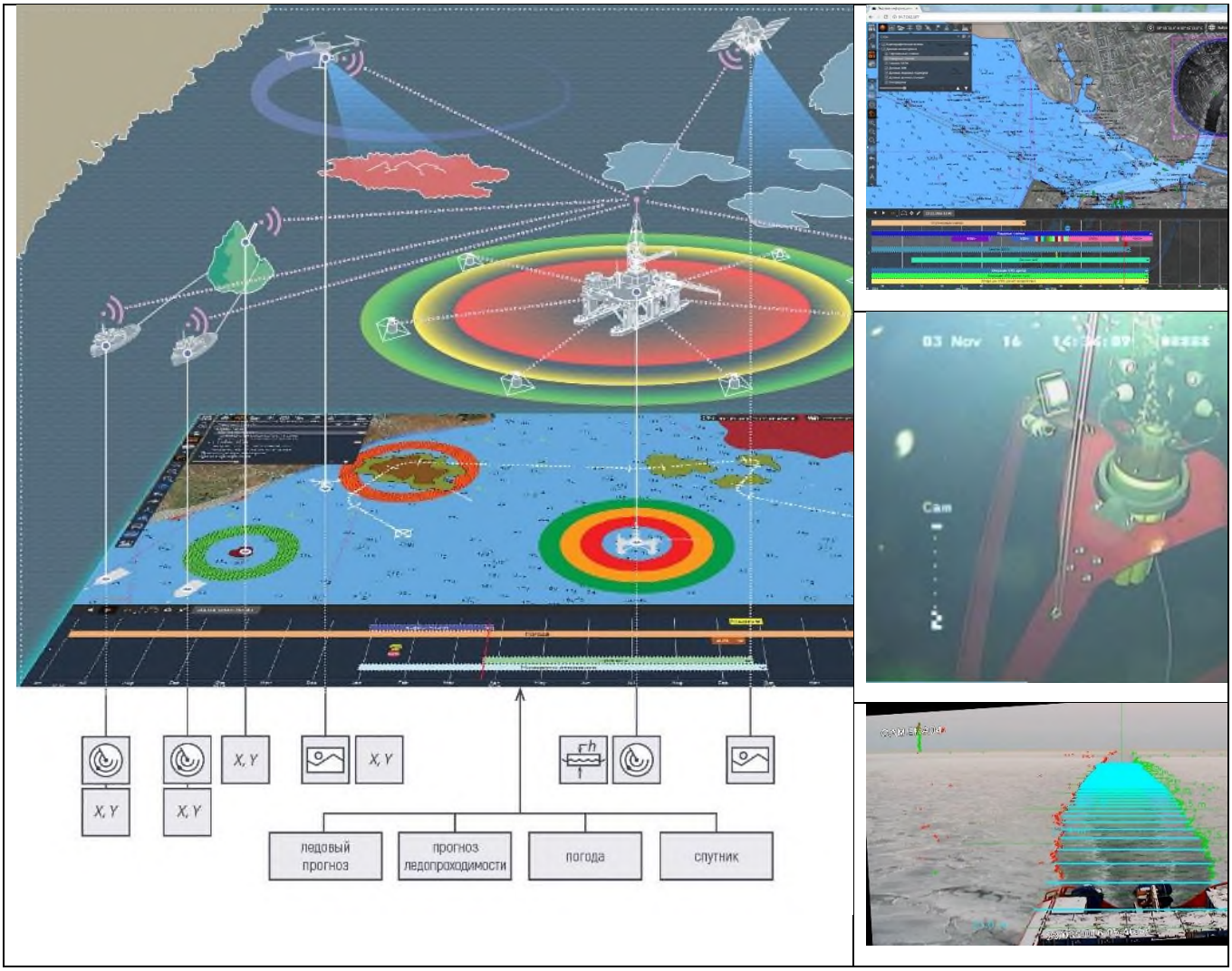


Рисунок 1.1. Фактическое судоходство в 2023 году в акватории северного морского пути и навигационной паузы с середины декабря 2022 по май 2023 [13]

Получение точных исходных данных о ледовой обстановке возможно при осуществлении непрерывного мониторинга с целью накопления данных о ледовой обстановке. Применение таких систем позволяет прогнозировать возможные аварийные ситуации, формировать достоверные данные о характеристиках и параметрах льда в зоне проектирования и эксплуатации ГТС. К таким системам можно отнести ледовую информационную систему (ЛИС), разработанную в рамках Федеральной целевой программы «Развитие гражданской и морской техники» в ОКР «Лед-Платформа: Разработка опытного образца комплексной системы управления ледовой обстановкой» с участием автора диссертационного исследования [11]. Для мониторинга ледовой обстановки вокруг объектов шельфа (см. рис. 1.2-А) в состав опытного образца входили: БЛА, донные станции,

радары, ледовые маркеры и бортовой измерительный комплекс для измерения толщины разрушаемого судном льда и мониторинга сделанного судном канала (см. рис. 1.2-Б).



А Б

Рисунок 1.2. Мониторинг и управление ледовой обстановкой для защиты объектов континентального шельфа (см. работу [11] автора исследования).
А – защищаемый объект и принцип работы системы; Б – экран ПО для мониторинга, донная станция и система визуального контроля канала за судном

Применение таких систем в комплексе с мероприятиями управления ледовой обстановкой, технологиями по защите ГТС от ледового воздействия позволяют обеспечить эксплуатационную надежность морских портов арктических регионов и водную безопасность территории, безопасность ГТС, а также сформировать достоверные данные для расчета ледовых нагрузок и спрогнозировать их воздействия на эксплуатирующиеся и проектируемые ГТС.

Исходя из СП38.13330, ГТС может подвергаться следующим видам воздействия:

а) ***нагрузкам на сооружения*** от полей ровного льда вследствие действия ветра или течения, а также ***при передаче усилий при подходе к ГТС*** дрейфующего поля льда или ***судна арктического класса***;

б) нагрузкам на сооружения от сплошного ледяного покрова вследствие его температурного расширения;

в) локальному удару ледовых образований;

г) вертикальным нагрузкам от примерзшего к сооружению ледяного покрова при колебаниях уровня воды;

д) истиранию элементов конструкции льдом.

Согласно исследованиям [14], [15], [16], [17], [18], [19] представляющие опасность для ГТС (в зависимости от их конструкции) ледовые воздействия можно разделить на следующие группы.

1. Нагрузки, возникающие в результате движения льда (динамическое давление льда), или передача усилий через сплошной лед. К этой группе можно отнести воздействия типа *а, в.* (Является *основным видом воздействия* рассматриваемая в работе, в частности пункт *а*)

2. Нагрузки, возникающие в результате вмерзания сооружения в лед (статическое давление). К этой группе в свою очередь можно отнести воздействия типа *б, г.*

3. Иные нагрузки, возникающие в результате низкой температуры и косвенно воздействующие на ГТС (например, изменение свойств материалов, грунтов под действием отрицательных температур). (Подробное рассмотрение этой группы воздействия выходит за рамки диссертационного исследования.)

1.1.1. Нагрузки, возникающие в результате вмерзания сооружения в лед (статическое давление)

При вмерзании сооружения в лед происходит увеличение нагрузки, связанной с образованием наростов, воротников, создаются вертикальные усилия в результате колебания уровня воды, которые усугубляются термическим расширением льда между элементами конструкции, где нарастает лед.

Между опорами вырастает внутреннее ледяное образование (пробка или воротник), усугубляющееся «набивкой» колотого льда и флуктуацией температур, что приводит к повышению нагрузки на ГТС вследствие увеличения площади контакта с полем льда и возрастанию глобальной горизонтальной нагрузки на сооружение в начале подвижки ледяного поля. Ледяное образование оказывает приливно-отливное давление на элементы ГТС.

Термическое расширение льда для ГТС опасно в случае наличия жестких и высоких границ сооружения, между которыми нарастает лед. Для снижения статических нагрузок наличие демпфирующих компенсаторов будет решением возникающих проблем. В качестве компенсаторов могут использоваться ИВО (искусственно-вмороженные объекты).

1.1.2. Нагрузки, возникающие в результате движения льда (динамическое давление льда)

При движении ледового поля на ГТС и после соприкосновения с несущими элементами сооружения возникает давление, посредством которого создаются усилия, прикладываемые в области контакта льда и конструктивного элемента. Под воздействием ледовой нагрузки (как глобальной, так и локальной) при разрушении льда возникают колебания и вибрация сооружения и конструктивных элементов, а также может происходить набивка льда между опорами сооружения.

Отдельно следует отметить сценарии, при которых возникает передача усилий от судов ледового класса через лед на ГТС во время работы у прикордонных частей акватории.

Взаимодействие льда с ГТС может протекать по одному из следующих вариантов или их комбинации:

- режим прорезания – разрушение и вынос разрушенных частиц льда из зоны контакта с сооружением;
- режим остановки – происходит удар льдины с сооружением, в результате которого лед останавливается;
- режим торошения – накапливание разрушенных и битых фрагментов льда, возникших в результате разрушения.

При этом определяющими факторами взаимодействия ГТС с полем льда являются:

- конструктивная особенность и податливость сооружения;
- характеристики ледового поля (физические свойства, толщина, скорость движения и площадь поля);
- соотношение масс поля льда и сооружения (с учетом присоединенной массы воды).

В зависимости от сочетания этих параметров возможны разные варианты взаимодействия поля льда с ГТС. Поэтому решение задачи по демпфированию усилий создаваемых полем льда, является актуальным при проектировании ГТС для северных регионов.

1.2. Анализ существующих технологий разрушения льда

Ввиду актуальности задачи, поставленной выше, сегодня существует большое количество различных подходов к разрушению льда около гидротехнических сооружений как с предложением новых технологий, так и с предложением использования различных ранее применяемых модификаций.

Большинство из них можно отнести к одной из групп [20] по виду воздействия и способа разрушения льда: механическому, термическому, химическому, электрофизическому и комбинированному.

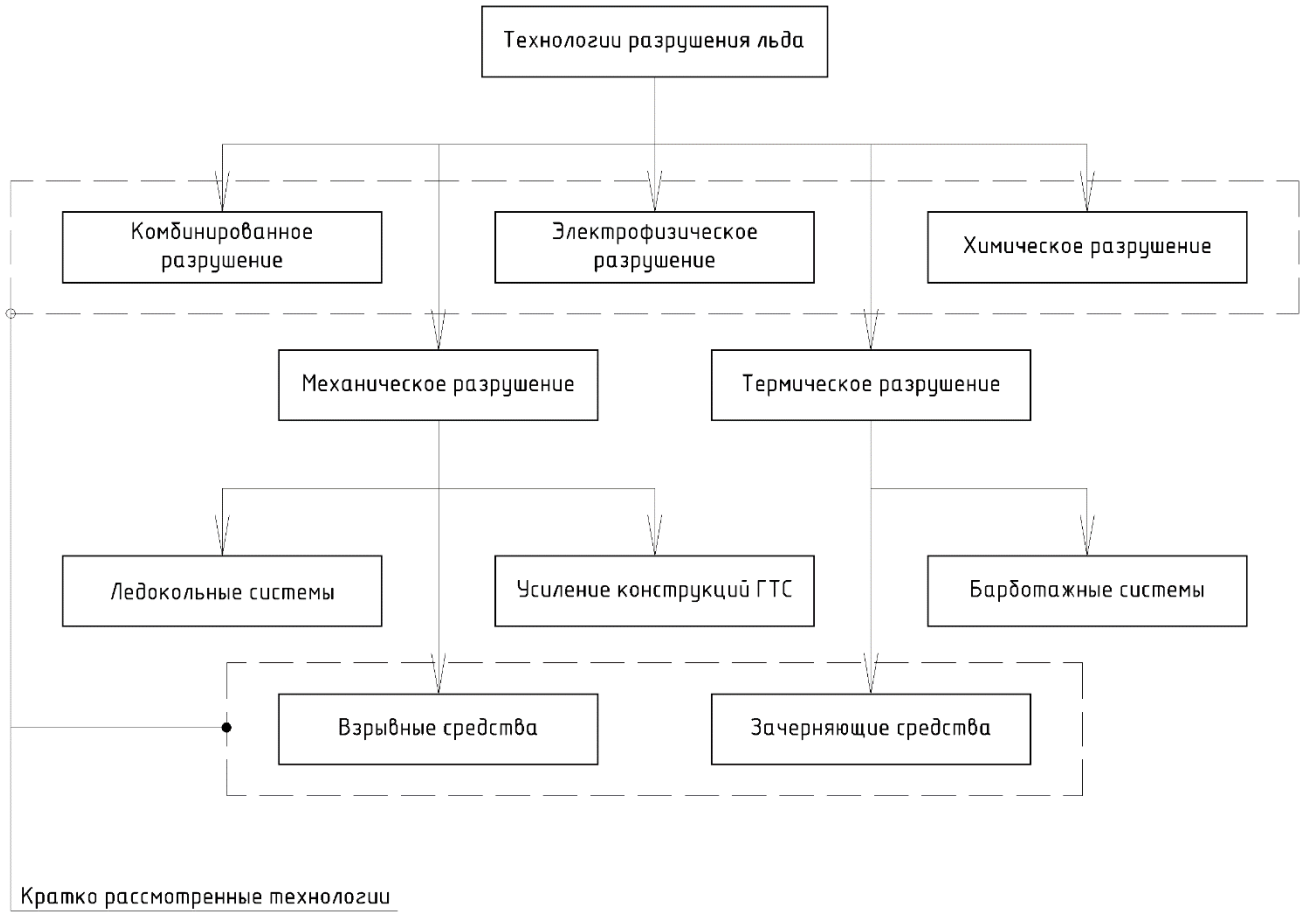


Рисунок 1.3. Классификация существующих технологий разрушения льда

Ниже приведены наиболее распространённые технологии, среди которых выделены самые близкие к предлагаемой в диссертации.

1.2.1. Механическое разрушение льда ледоколами

Разрушение ледяного покрова механическим воздействием является широко применяемым способом при борьбе с ледовым покровом на акватории. Одним из таких способов является применение ледоколов и различных ледокольных систем, которые воздействуют корпусом (или насадками) на лед, разрушая его изгибом и/или сжатием. Классические ледоколы выполняют разрушение льда

изгибом, направленным вниз, и применяются для прокладки судоходных каналов или для разрушения ледового покрова акваторий порта (с использованием различных схем [11] движения ледокола через поле льда).

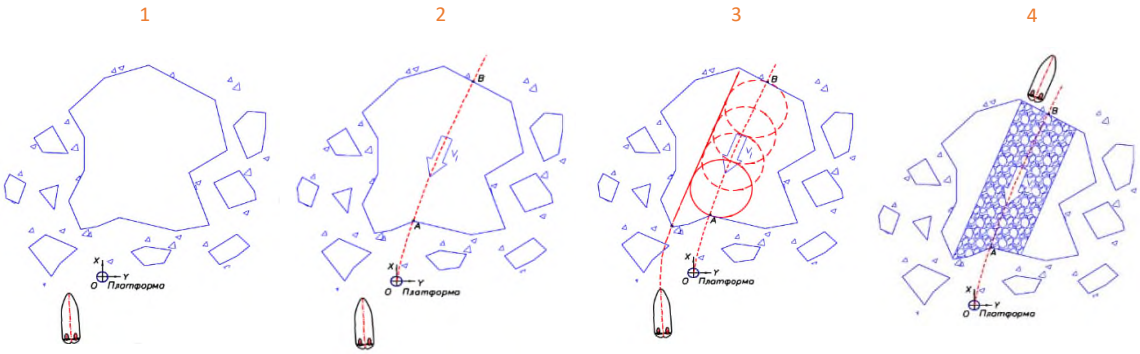


Рисунок 1.4. Пример схемы движения ледокола через поле льда [11]

По мнению ученых [20], могут применятся насадки, ломающие лед изгибом вверх.

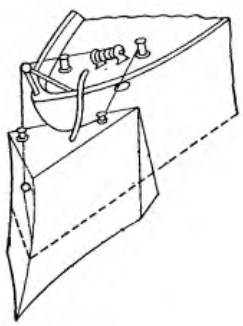


Рисунок 1.5. Схема носа/насадки для разрушения льда изгибом вверх.

Помимо применения ледоколов могут использоваться специализированные технологии механического разрушения льда:

- разрушение льда и очистка акватории с помощью винтов буксира, что создает направленную струю в сторону ледового покрова [21];

- разрушение ледового покрова с помощью судов на воздушной подушке (СВП) с созданием фронтальной волны или разрушение резонансом предварительно ослабленного канавками ледового покрова [22] или совместно с генератором, который дополнительно воздействует на ледяной покров с частотой 106-107Гц [23].

Однако, по мнению автора диссертации, применение ледоколов считается наиболее целесообразным. Вместе с тем опыт эксплуатации ледоколов в порту Дудинка [15] показал, что недостаточно аккуратное использование ледоколов при очистке акватории от льда может привести к разрушению шпунтовых стенок. В зависимости от местных условий расстояние от стенки, на котором движется ледокол, и угол его перемещения относительно кордона должны быть определены в каждом конкретном случае. Опыт Дудинки [15] продемонстрировал, что эффективным и безопасным методом борьбы со льдом, примерзшим к причальной шпунтовой стенке, является использование не ледоколов, а вибраторов. В результате работы излучателей, установленных на лед на определенном расстоянии от стенки, нарушалась связь шпунта с намерзшим льдом, после чего он мог быть удален буксирами.

Ледокольные нагрузки представляют [15] существенную опасность для ГТС, т.к. круглогодичная работа порта предусматривает постоянную работу ледоколов для разрушения ледового покрова на акватории, подходных путей при отводе примерзших к причальной стенке судов. В результате работы ледоколов наблюдаются разрушения замков шпунта (Ларсен V с высотой 11,4 м над уровнем дна), вмятины в шпунте, трещины в железобетонных кордонных балках. Особенно опасна работа ледоколов параллельно кордону.

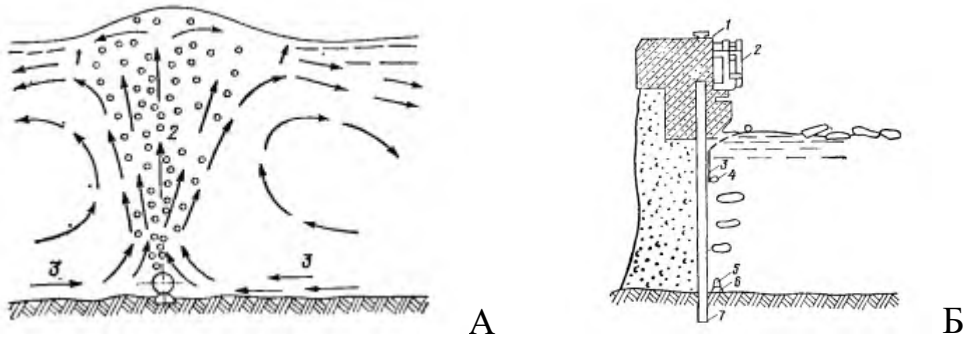
В этой связи актуальным является поиск других способов разрушения льда в непосредственной близости к причальной стенке.

1.2.2. Термическое разрушение льда барботажем

Термическое разрушение льда подразумевает под собой объемное тепловое воздействие на ледовый покров акватории либо не дающее ему формироваться, либо приводящее к его полному исчезновению. Среди различных технологий, основанных на тепловом воздействии на лед, особое место занимают барботажные установки (использующие пузырьки воздуха) [24] или же

модификация с применением непосредственно теплых слоев воды, как представлено в трудах [25].

Как отмечают ученые [15], [20] [26], в большинстве северных портов температура воды у дна водоема не ниже +3 С и подо льдом она на 0,2 С выше температуры замерзания. Применение барботажных установок позволяет использовать тепловую энергию глубинных вод, при этом создаются циркуляционные течения, и более теплая вода поднимается со дна порта (+3 С) к поверхности, где находится ледовый покров. Это способствует решению двух задач: предотвращению образования льда или формированию его пористой структуры за счет пузырьков воздуха, используемых для барботажа. Считается, что барботаж, как и любая другая тепловая технология [27], очень эффективен в совокупности с использованием дешевых источников теплой воды или пара, например при создании вертикального воздушного барьера из пузырьков, который формирует представленный на рис. 1.6-А поток воды.



А Б

Рисунок 1.6. Схема работы барботажной установки [20]
А – схема работы донной барботажной установки акватории: 1 – поток, разрушающий лед, 2 – восходящий поток, 3 – донный поток. Б – схема работы пристенной барботажной установки: 1 – пирс; 2 – отбойное устройство пирса; 3 – рама с осью вращения; 4 – трубопровод с теплоносителем; 5 – барботер; 6 – фундамент барботера; 7 – воздуховод

Также следует отметить, что с помощью барботажных средств, которые на основе термического разрушения льда создают полынью, незамерзающие майны или воздушные полости послойно внутри льда (рис. 1.6-Б). Пример применения барботажных установок совместно с источником теплой воды представлен в порту Вуосаари, Хельсинки (Финляндия).

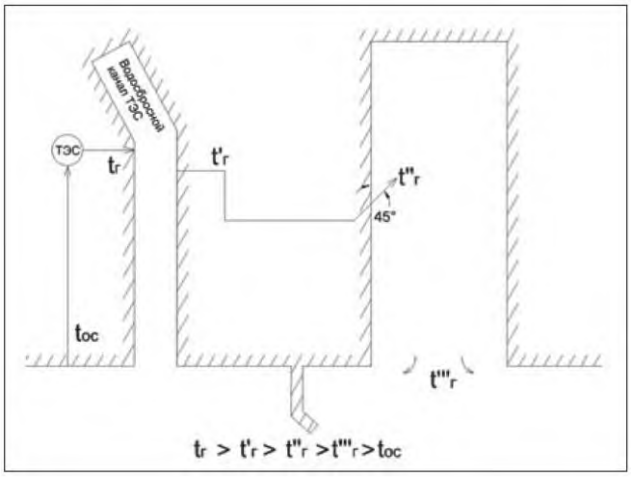


Рисунок 1.7. Схема тепловых потоков порта Вуосаари, Хельсинки [28]

Как показано на Рисунке 1.7, теплая вода $t_{r,}$ образующаяся при работе тепловой энергостанции (ТЭС), поступает в водосбросной канал, откуда с t'_r забирается насосами через донную систему труб и подается с t''_r под углом в 45° внутрь акватории порта. Перемешиваясь посредством применения барботажных установок, вода равномерно прогревает всю зону t'''_r порта и защищает его от ледообразования.

Эффективность этой технологии зависит от таких факторов, как температура воды и льда, температура воздуха, плотность выпускаемой воды и т. д. Также следует заметить, что эта система предназначена для использования в водоемах, обладающих запасами естественного тепла. В противном случае, если не следить за применением барботажной системы, выполнить развертывание с ошибками и в непредназначенных для этого регионах, можно столкнуться с нарастанием донного льда. Эффект использования барботажа в условиях Дудинки оказался отрицательным: холодная вода, приносимая с поверхности воды ко дну, замерзала, образуя формацию, мешающую причаливанию. Борьба с донным льдом значительно труднее, чем с поверхностным [15]. Т. к. использование данного метода достаточно сложно в реализации, в представленной работе автор предлагает рассмотреть более технологичный способ защиты ГТС от ледового воздействия.

1.2.3. Краткий обзор других технологий

Электрофизический способ разрушения льда является не самым популярным и заключается в использовании высокочастотных магнитных полей, облучении радиацией, применении ультразвуковых и резонирующих устройств и т. д. К такому способу можно отнести следующие патенты:

- способ разрушения морского льда, состоящий из облучения его толщи сверхвысокочастотной энергией, которая воздействует на жидкость, содержащуюся в виде капсул в толще морского льда [29];
- способ разрушения ледяного покрова судном на воздушной подушке, движущимся с резонансной скоростью совместно с генератором, который дополнительно воздействует на ледяной покров с частотой 106-107Гц. [30].

Механическое разрушение льда с применением взрывных средств больше подходит для вскрытия водоемов и прокладки судоходных каналов. К этому методу можно отнести такие патенты, как способ разрушения ледяного покрова, включающий установку под лед зарядов взрывчатого вещества и их поочередный подрыв с интервалом, равным времени прохождения изгибно-гравитационной волны от места подрыва предыдущего до места подрыва последующего зарядов [31].

Термическое разрушение льда с помощью зачерняющих лед средств за счет использования солнечной энергии путем уменьшения отражающих свойств льда/снега. Выпадение снега также существенно снижает эффективность такого подхода. Эффективность метода существенно зависит от средней дневной температуры воздуха и от интенсивности солнечного излучения; здесь можно выделить:

- зачернение льда и зачернение с применением фокусирующей линзы для ускорения процесса разрушения [32], [33];

- зачерение небольшого поля льда с помощью укладки на поверхность льда эластичного материала темного цвета [34] так, чтобы лентами была образована клетчатая структура покрытия его поверхности, обращенной к солнцу.

Комбинированное разрушение льда – метод, при котором совмещают несколько способов разрушения льда, например ослабление термическим способом и разрушение механическим. Такой подход позволяет более эффективно разрушать ледовое поле и расширять зоны применения.

Один из примеров комбинированного метода (представлен в патенте [35]), где за счет пневмоустройств создается воздушная полость под ледовой поверхностью, а после благодаря силе тяжести лед ломается самостоятельно.

В результате проведенных автором патентных исследований выявлено многообразие технологий защиты ГТС от ледовых воздействий. Но в каждом из подходов есть свои недостатки, что сужает область их применения, делает их ресурсозатратными или же не подходящими для защиты ГТС в различных условиях ледообразования. Выполненные автором патентные исследования по принципам, изложенным в ГОСТ Р 15.011–96 [36], выявили патентную чистоту предлагаемой технологии снижения ледовых нагрузок на ГТС.

1.3. Анализ технологий по усилению конструкций ГТС

Анализ конструкций объектов шельфа, представленный в работе автора диссертации [10] и выполненный в рамках реализации ОКР «Тренажер-добыча», ФЦП РГМТ 2009-2016 по технологическому направлению 1 «Освоение шельфа», определил основные характеристики ГТС морского базирования [10], особенности конструкций стационарных добывающих и накопительных платформ, отгрузочных терминалов (совмещенных с платформами), танкеров и плавучих накопителей нефти [10], а также особенности конструкций ГТС для прямой отгрузки нефти [10]. Из проведенного анализа видно, что осуществлено

конструктивное усиление всех видов ГТС в арктических регионах, обоснованное на стадии проектирования.

При проектировании ГТС, которые подвергаются ледовому воздействию, учет ледовой нагрузки заключается в

- расчете на устойчивость и прочность сооружения;

- расчете и выборе типа материала и его локальной прочности.

Применение классических и типовых вариантов конструкций ГТС на сопротивление ледовой нагрузке, рассчитанной на прорезывание льда или удар льдины, иногда может оказаться затруднительным и трудновыполнимым. С целью уменьшения и снижения горизонтального воздействия, созданного льдом, ГТС защищают различными заградительными сооружениями, молами, свайными кустами, устраивают ледовые пояса, запани или непосредственно модернизируют несущие элементы, создавая фронтальные щиты или наклонные поверхности.

1. В случае создания заградительных сооружений, для защиты акватории зачастую используют защитные молы различных конструкций: отсыпные, массивные гравитационные, с применением наклонных свай и железобетонным оголовком сверху.

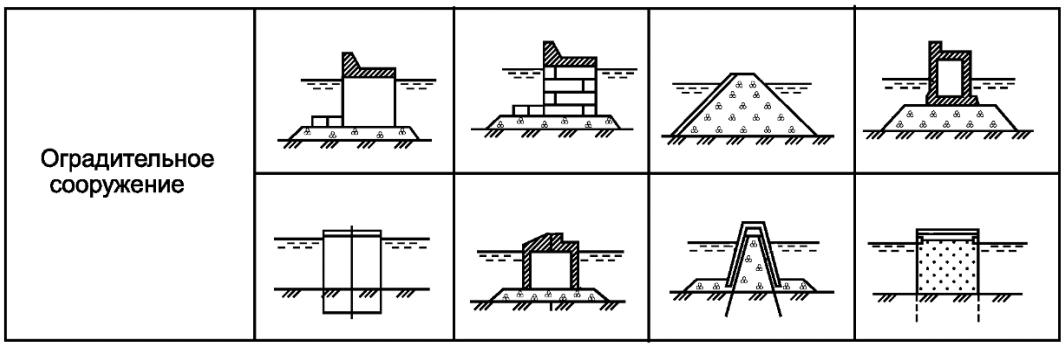


Рисунок 1.8. Примеры защитных молов

В арктических регионах главной задачей оградительных сооружений (ОС) является не только защита от волнения, но и восприятие основной нагрузки от ледовых полей и свободно плавающих льдин. Но ОС не защищают ГТС от усилий:

- полей льда, которые способны попасть в акваторию порта через фарватер;
- льда, образованного на самой акватории порта;

- при сближении судов или других льдин, которые передаются на ГТС через окружающий их лед.

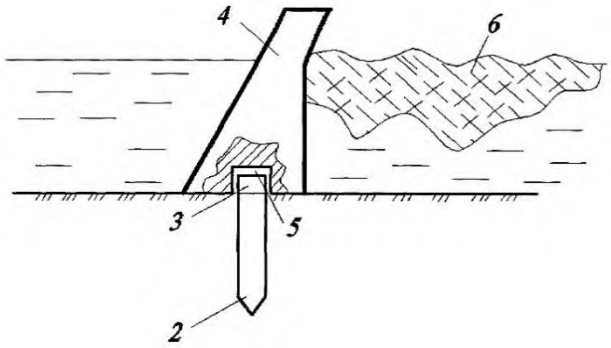
Поскольку предлагаемая автором технология снижения нагрузок может рассматриваться как «заградительная», поэтому был проведен второй патентный поиск, в результате которого выявлена патентная чистота предлагаемой автором технологии и выделены некоторые наиболее интересные варианты типов заградительных сооружений, представленные ниже.

а) Устройство (на рис. 1.9-А) содержит забитые в морское дно по периметру объекта отдельно друг от друга сваи с выступающими над дном прямоугольными головками (2) и железобетонные быки с глухими прямоугольными отверстиями в нижней части (4), которыми быки насажены на головки свай и установлены на морском дне. Быки разрушают лед (6), стираются и легко заменяются [37].

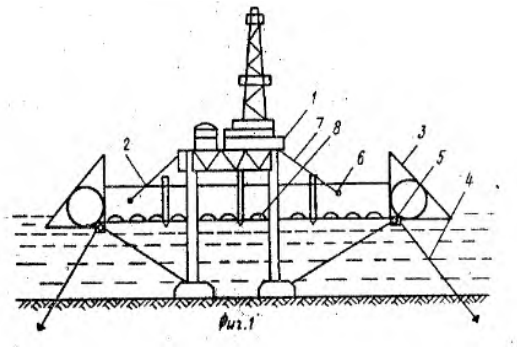
б) Устройство для защиты буровых объектов от разрушения при движении ледяных полей, содержащее искусственно образованное препятствие на пути дрейфующих льдов, выполненное в виде защитного барьера, установленного на дне водоема по периметру бурового объекта и закрепленного на дне сваями, при этом защитный барьер инициирует торошение дрейфующих льдов и образует вокруг бурового объекта круговой торос, в дальнейшем защищающий ГТС [43].

в) Устройство (рис. 1.9-Б), содержащее защитное заграждение из поплавков (3, 5) с тросами (2, 4, 6, 7) и якорями. Однако данное устройство выполняет пассивную защиту акваторий буровой (1) от мелких кусков плавающего льда и не может обеспечить их защиту от больших движущихся ледяных полей без применения дополнительных средств для измельчения льда [38].

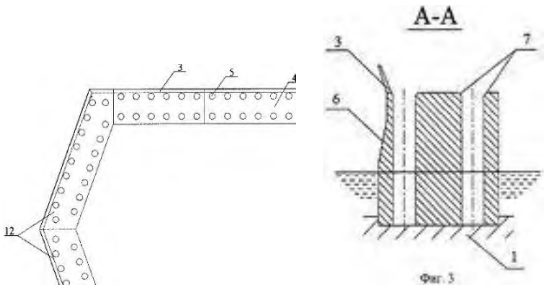
г) Устройство (рис. 1.9-В) противоледовой защиты для гидротехнического сооружения, расположенного на мелководном континентальном шельфе, включающее защитные (3, 6, 7) и закрепляющие элементы (1, 5), соединяющие защитные элементы (12) с дном акватории [39].



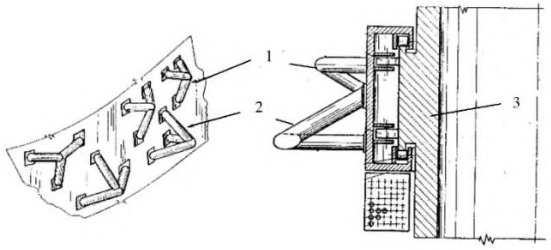
А



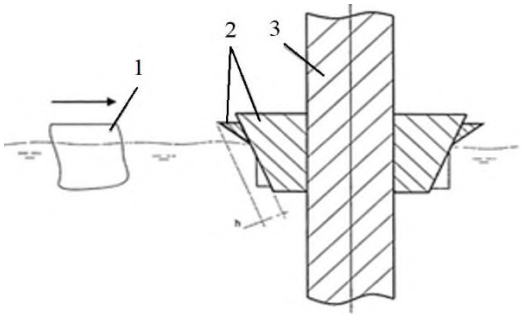
Б



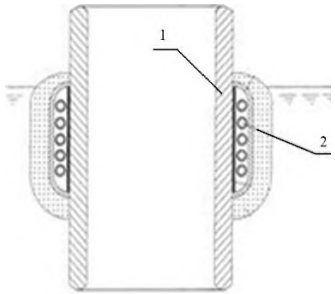
В



Г



Д



Е

Рисунок 1.9. Различные варианты заградительных сооружений для защиты ГТС и конструктивных усилий
А [37]; Б [38]; В [39]; Г [40]; Д [41]; Е [42]

2. Усиление самих конструкций ГТС, таких как эстакада, больверк, гравитационные сооружения и их комбинации, происходит не только посредством восприятия полной горизонтальной нагрузки (путем прорезывания и применения сплошных щитовых элементов), но и посредством использования конструктивных особенностей, таких, например, как создание шапочных наклонных поверхностей в зоне соприкосновения со льдом.

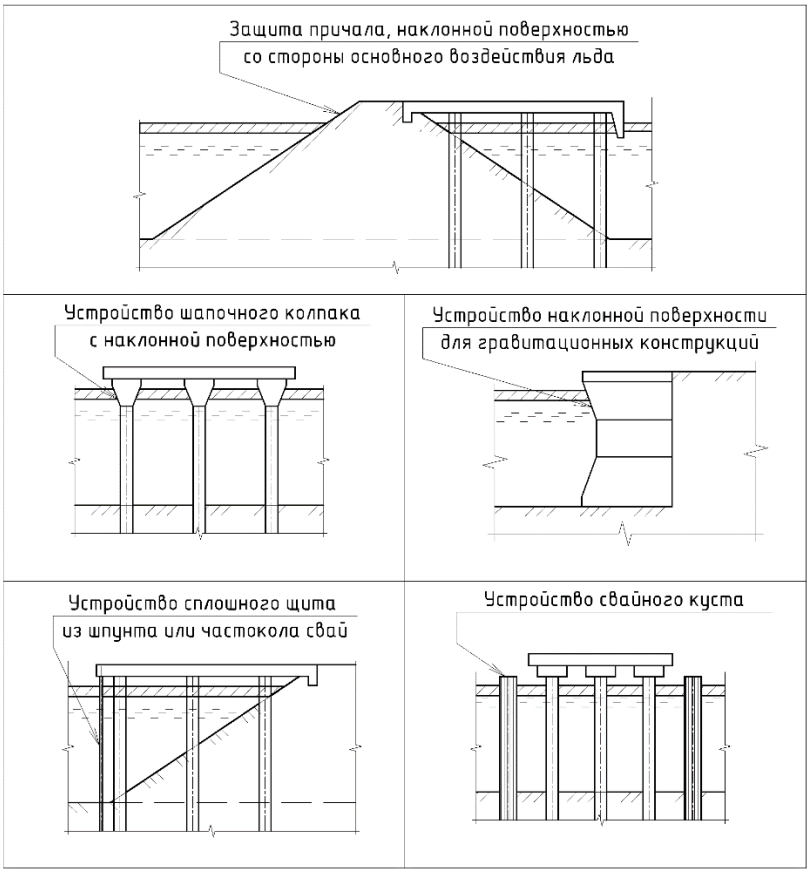


Рисунок 1.10. Схемы примеров усилений конструкций

Такой подход при усилении конструкций ГТС позволяет снизить горизонтальную нагрузку ото льда на несущие элементы (заставляя лед ломаться изгибом или же разрушаться засчет сжатия). Основной минус такого подхода заключается в том, что из-за больших колебаний воды или же колебаний воды, вызванных другими источниками, ледовая нагрузка может прийти на нерассчитанный для этого участок опоры, а в некоторых случаях затруднить швартовку судов, где отбойные устройства не смогут обеспечить достаточное расстояние от линии кордона.

Также автором был проведен патентный поиск, в результате которого представлены некоторые нестандартные варианты усиления конструкций и их защиты или формы модификации старых технологий:

- ледорез (рис. 1.9-Г), установленный в замерзающих морях, имеет на уровне защиты от ледовых полей крепление (3) для двух венцов (1, 2) препятствий для разрушения льда, при этом один из венцов размещен выше другого [40];

- устройство (рис. 1.9-Д) включает защитную бандажную конструкцию (3), выполненную в форме усеченного конуса (2) для разрушения льда (1) изгибом вниз, на контактной поверхности которой расположены пирамидальные выступы, создающие в ледовом поле локальные концентраторы разрушений льда [41];

- устройство (рис. 1.9-Е) для защиты опор (1) морских инженерных сооружений от переменных нагрузок внешнего ледового воздействия, содержащее защитный блок в виде бандажной конструкции (2), охватывающей опору морского инженерного сооружения [42].

Также в трудах В. В. Тарасова, П. С. Иушина «Примеры активной ледовой защиты морских нефтегазовых сооружений и новые разработки с использованием мягких надувных оболочек для разрушения льда» [44] представлены варианты защиты свайных опор с подвижным контуром. Такой способ позволяет компенсировать недостатки для переменного уровня воды, но для многосвайной причальной конструкции данный способ ресурсо- и энергозатратен и – самое главное – сложен в эксплуатации.

По совокупности проведенного нами поиска, описанного в пп. 1-3 данного раздела, выявлена патентная чистота предложенной технологии, а наиболее близкие прототипы обладают характерными отличиями.

1.4. Концепция выбора технологии снижения прочности ледового поля с использованием искусственно вмороженных объектов

Ледовая нагрузка на ГТС чаще всего проявляется при воздействии внешних факторов на сам ледовый покров (например, таких как течение, ветер, столкновение с другими полями или во время использования судов ледового класса) [3], [45]. В процессе разрушения льда возникают усилия, способные повредить причальные сооружения, в основном в области переменного уровня воды [15]. И, как определено в п.1.3, для предотвращения разрушения гидротехнических сооружений в закрытых и/или защищённых акваториях используются методы ломки льда, методы уменьшения его прочности или усиление конструкций ГТС.

Согласно литературным источникам и на основе патентного обзора можно определить три основных направления по защите ГТС от ледовых образований на ***закрытой акватории***:

1. вскрытие ледового покрова с помощью ледоколов или взрывов, однако которые могут представлять опасность для ГТС;

2. создание дополнительной защиты сооружения с помощью устройств, способных самостоятельно воспринимать ледовую нагрузку от подвижных ледовых образований. В этом случае технологии направлены на усиление конструкций ГТС, создание ограждений, которые сейчас наиболее часто используются для платформ, маяков и прочих ГТС, расположенных на свободных акваториях, вне заградительных конструкций;

3. создание средств предварительного ослабления льда и построения распределенных демпферов для защиты объектов ГТС. Данное направление выбрано автором как основное в рамках текущего исследования.

В качестве новой технологии, позволяющей снизить ледовую нагрузку на ГТС, автором предлагается использовать иррегулярно расположенные полупогруженные шарообразные искусственно вмороженные объекты (далее – ИВО) ([8], [9]) большого диаметра, которые будут при замерзании акватории

нарушать целостность ледового поля. Использование ИВО поможет уменьшить прочностные характеристики ледяного покрова акватории, что позволить демпфировать усилия, передаваемые через ледовое образование (ЛО) вокруг ГТС:

- от проходящих судов ледового класса (СЛК) и
- при столкновении ЛО с другими льдинами,

а также позволит избежать использование дорогостоящих ледоколов или систем термического воздействия на ледовый покров акватории.

Идея использования вмороженных шариков при решении задачи создания модельного льда для исследования движения судов во льдах изложена в трудах Е. М. Грамузова [46], в которых искусственно вмороженные объекты (малоразмерные шарики), могут применяться в качестве модельного льда в опытном бассейне: т.е. была создана «композитная модель льда», состоящая из несколько слоев мелких шариков, верхние слои которых проморожены, а нижние находятся в свободной воде. При этом, варьируя их количество и диаметр, можно достичь необходимой модельной прочности ледового покрова. Однако подход Е. М. Грамузова не применялся и не исследовался с целью возможности защиты ГТС от ледовых нагрузок.

Наиболее близкий подход к предлагаемой автором технологии представлен в [38] и рассмотрен нами в п.1.3. Однако основные отличия заключаются в том, что автор рекомендует покрывать всю акваторию порта свободноплавающими ИВО, а не только заякоренными «защитными поплавками», установленными по периметру платформы, как это реализовано в [38].

Для этого в работах ([8] и [9]) было предложено производить искусственное вмораживание в ледовую поверхность объектов, обладающих низким коэффициентом адгезии (приложение 2) по отношению ко льду, которые нарушали структурную однородность и уменьшали эффективную резистивную площадь сечения льда, предотвращая его пространственное армирование.

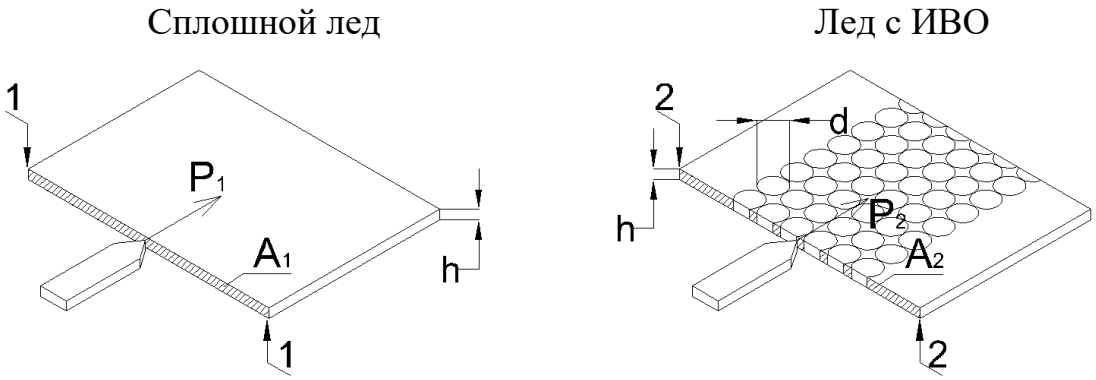


Рисунок 1.11. Схематическая модель поля сплошного льда и льда с ИВО

Как видно из рисунка, наличие ИВО на поверхности защищаемой акватории и в толще льда должно позволить снизить прочность льда на изгиб. В диссертационной работе поставлена задача по исследованию этого эффекта. В исследованиях будут использованы аналитические решения, численное моделирования, полевые и лабораторные эксперименты.

Выводы по Главе 1

1. На основе нормативных документов и дополнительных литературных источников описаны ***типы ледовых воздействий***, из которых в рамках диссертационного исследования выделены основные, а именно: ***нагрузки на сооружения*** от полей ровного льда вследствие действия ветра или течения, а также сценарии ***передачи усилий при подходе к ГТС*** дрейфующего поля льда или ***судна арктического класса***.

2. На основе анализа научных данных обобщены проблемы эксплуатации ГТС ***при ледовых воздействиях***. Описаны группы разрушения ледового покрова, а также сформулированы три основных направления по борьбе со льдом: вскрытие ледового покрова; ледовое воздействие на ГТС на открытой акватории; ледовое воздействие на ГТС в закрытых и/или защищённых зонах, ослабление ледового покрова.

3. Рассмотрены современные и наиболее распространенные технологии снижения ледовых нагрузок на ГТС для закрытых и/или защищённых акваторий арктических портов РФ. Выявлены недостатки применяемых способов по борьбе со льдом, заключающиеся в образовании донного льда (для барботажа) и появлению горизонтальных усилий, превышающие расчетные, передаваемые через лед на ГТС (использование ледоколов).

4. Поставлена задача настоящего исследования по обоснованию новой пассивной технологии снижения передаваемых через лед нагрузок на ГТС в закрытых акваториях и обеспечения устойчивого функционирования морских портов арктических регионов, не требующей применение ледоколов.

5. На основе проведенного патентного исследования выявлена чистота предлагаемой технологии.

ГЛАВА 2. СНИЖЕНИЕ ПЕРЕДАВАЕМЫХ ЧЕРЕЗ ЛЕД НАГРУЗОК НА ГТС С ПОМОЩЬЮ ИВО. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ

На основе анализа, проведенного в предыдущем разделе работы, в этой главе автором предлагается новая технология снижения передаваемых через ледовый покров нагрузок на портовые сооружения, путем уменьшения прочностных характеристик льда с помощью иррегулярно вмораживаемых объектов (далее – ИВО), которые размещаются на закрытых акваториях портов. Эта технология поможет в обеспечении долговечности и устойчивого функционирования морских портов арктических регионов путем снижения горизонтального усилия, созданного первыми подвижками ледовых образований или при сценарии передачи через лед на ГТС усилий при сближении судов ледового класса или при столкновении с другими льдинами.

На основе широко используемых подходов выполнен теоретический анализ взаимодействия льда с поверхностью ГТС и произведена теоретическая проверка концепции предлагаемой технологии по перфорации льда с помощью ИВО за счет снижения усилий, предаваемых через лед, на ГТС. Определены основные параметры ИВО, влияющие на эффективность предлагаемой технологии, определены направления дальнейших исследований.

Основные результаты главы представлены в ряде публикаций автора (см. в списке литературы [8], [9], [11], [47]).

2.1. Концепция новой технологии снижения прочности ледового поля с использованием искусственно вмороженных объектов

При проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) в арктических регионах [5] одним из важных условий является учет ледовых нагрузок. Ледовые образования создают собственные нагрузки и также участвуют в передаче усилий от внешних воздействий, возникающих при

движении судна вблизи ГТС или при столкновении с другими ледовыми образованиями (далее внешних воздействий).

Взаимодействие льда в закрытых акваториях портов с учетом различных конструкций ГТС при основных внешних воздействиях представлена на рис. 2.2. С целью дальнейшего анализа на рис. 2.2. выделены основные типы конструкций ГТС арктических регионов и способы воздействия с ними.

В условиях закрытых акваторий портов естественное разрушение льда прорезыванием затруднительно, а порой и недостижимо ввиду ограничений, накладываемых в рамках соблюдения безопасности швартовки и стоянки судов (таких как течение, волнение, ветер и т. д.). В результате чего происходит вмерзание сооружения в лед, что увеличивает толщину ледового покрова вблизи причальной стенки [48] (см.рис. 2.1).

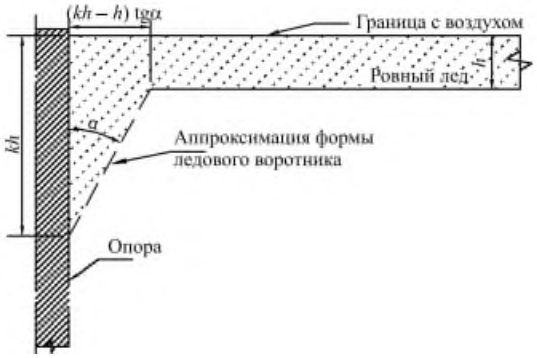


Рисунок 2.1. Схема изменения толщины льда ГТС [48].

Как показал обзор технологий, проведенный в главе 1, не всегда представляется возможным защитить акватории от покрытия льдом. В частности, увеличение толщины ледового покрова вблизи ГТС (рис. 2.1) в совокупности с использованием ледоколов может приводить к повреждениям причальной стенки. По мнению автора, в закрытых акваториях портов, ***механическое разрушение ледового покрова возможно*** не только на стыке причальной стенки со льдом [49], но и ***на контакте наклонной поверхности со льдом***, которая является внешним источником сил (на пример на контакте судна и льда рис. 2.2) в зависимости от того, какое предельное состояние наступит раньше [50] (сжатие или изгиб).

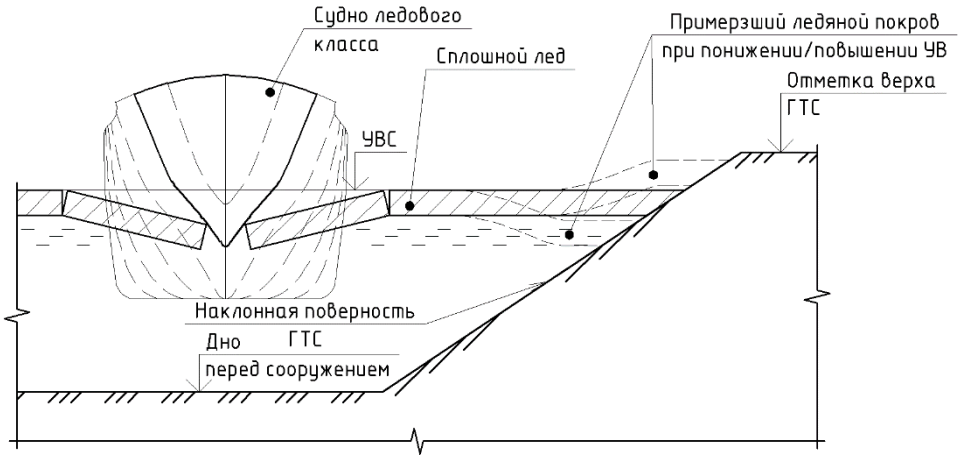
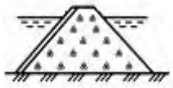
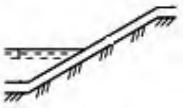
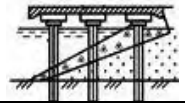
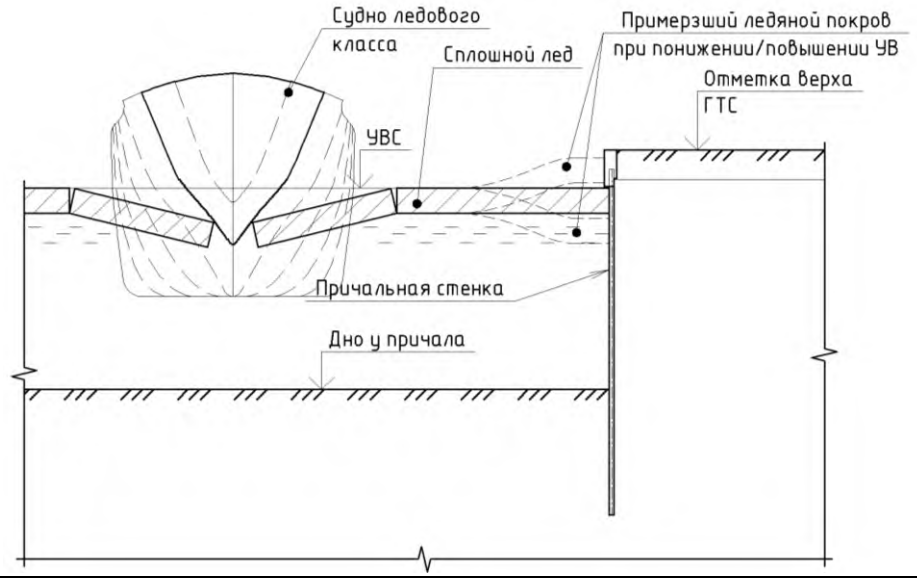
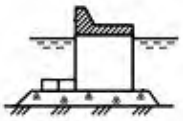
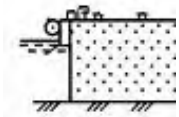
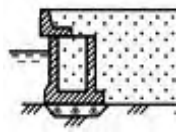
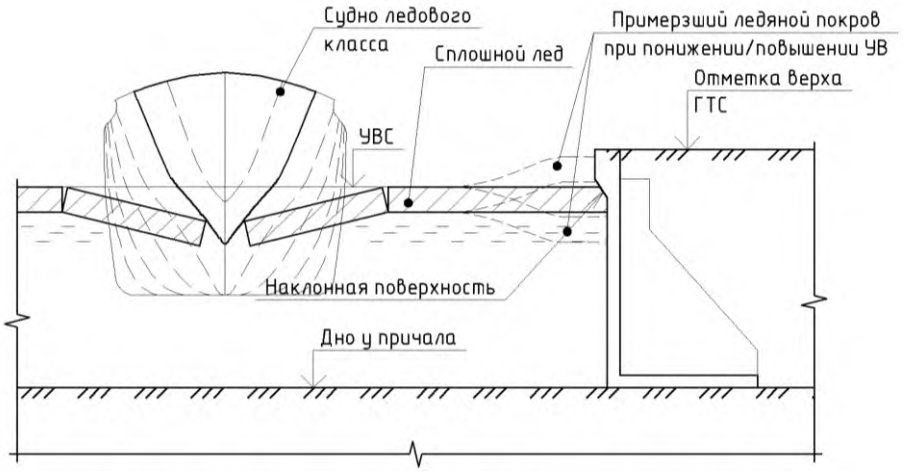
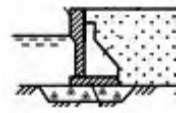
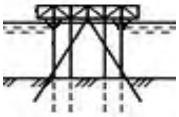
Схема взаимодействия ледового покрова с ГТС при внешних воздействиях	Примеры конструкций
Наклонная поверхность ГТС > 0°  	Оградительные сооружения  Берегоукрепления, слипы  Подпричальный откос 
Вертикальная поверхность ГТС  	Оградительные сооружения  Причалы (ж.б./шпунт)  
Наклонная поверхность ГТС < 0°  	Причалы (ж.б.)  Эстакада (с ж.б. колпаком/ козловые опоры) 

Рисунок 2.2. Схема взаимодействия льда с ГТС при передаче усилий через ледовый покров

Для снижения передаваемой горизонтальной нагрузки, через лед, на ГТС от внешних источников сил, автор предлагает новую технологию снижения прочности ледового поля с использованием ИВО. Основная идея предлагаемой технологии заключается в использовании иррегулярно расположенных полупогруженных шарообразных, искусственно вмороженных объектов (ИВО), заполняющих поверхность навигационной акватории, которую предстоит защищать от замерзания. Располагаясь вплотную друг к другу, ИВО образуют ослабленный отверстиями (перфорированный), демпфирующий ледовый покров и термическое «одеяло» (рис. 2.3). Для защищаемой акватории порта использование ИВО при замерзании акватории будет нарушать целостность ледового поля, создавая концентрации напряжений:

- перфорированное поле льда с помощью ИВО у защищаемых ГТС будет способствовать разрушению целостности ледовых образований при приливно-отливных явлениях, при ветроволновом воздействии на акваторию, при взаимодействии с внешними ледовыми образованиями или при движении судов ледового класса;

- судно (как частный случай внешнего воздействия), направляясь к причалу, будет раздвигать ИВО, притапливая некоторые из них, обеспечивая проход, и самостоятельно ломать ослабленный лед, образовавшийся между вмороженными объектами. После прохода судна или ветроволновых, приливных явлений, ИВО всплывают.

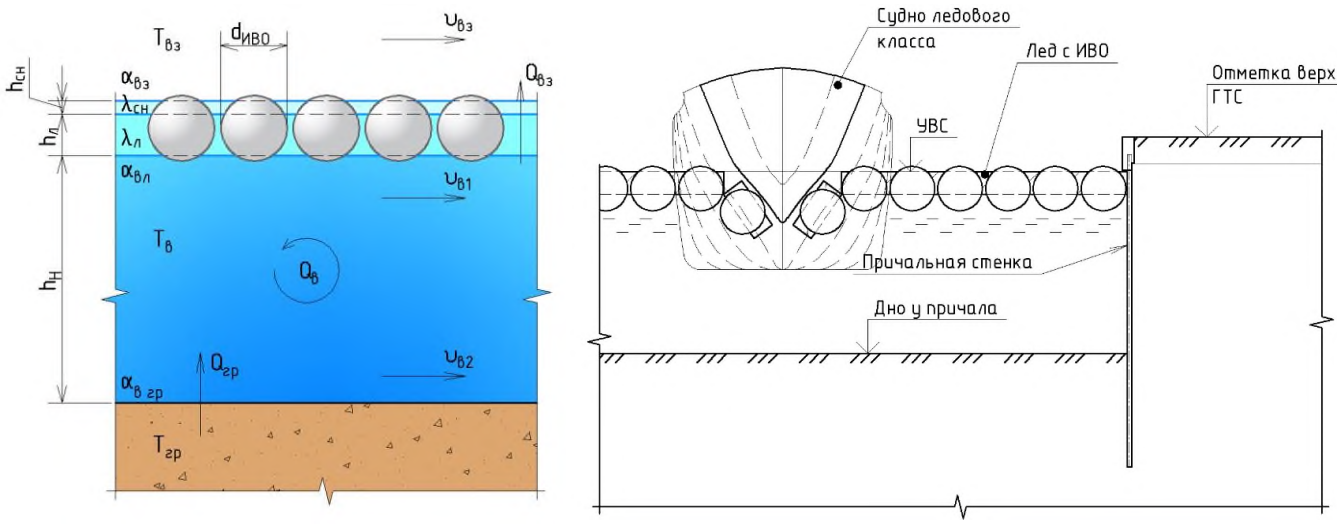


Рисунок 2.3. Схема термоизоляции ИВО и схема взаимодействия в системе «ГТС-лед-судно» при использовании ИВО

Q – теплопотоки: воды (в), грунта (гр), воздуха с учетом поверхностного слоя (вз); υ – течение у дна (в2) и у поверхности (в1); α – коэффициент теплоотдачи; h, λ – параметры теплопроводности по слоям; d – геометрические размеры ИВО; h_H – глубина на акватории

Использование ИВО поможет уменьшить прочностные характеристики ледовых образований и позволит создавать меньшие нагрузки на ГТС (в частности, при сближении с ним судна ледового класса (СЛК)), а также избежать использования дорогостоящих ледоколов или установки дорогостоящих систем по воздействию на ледовый покров, описанных в п.1.2 Главы I.

2.2. Теоретическое обоснование снижения передаваемых через лед усилий на ГТС с помощью ИВО

Для определения нагрузки на ГТС, возникающей в результате передачи усилий ледовых образований[1], рассмотрим три варианта наклона поверхности ГТС: а) остро- и б) тупонаправленные наклонные поверхности с углом наклона β, на которых происходит разрушение льда изгибом, и в) вертикальная поверхность, на которой происходит разрушение льда сжатием.

[1] При движении собственного поля льда, судов ледового класса или при столкновении собственного поля с другими ледовыми образованиями.

В наиболее общем виде основные варианты взаимодействия ледовых образований с ГТС представлены на рис. 2.4. С целью теоретического обоснования возможности применения ИВО для снижения передаваемых через лед усилий на ГТС воспользуемся широко известными зависимостями для плоской стационарной задачи, для которой должны выполняться следующие условия [16], [51]:

1. Обеспечение первичных условий для достижения начала разрушения льда изгибом:

1.1. *Угол наклона поверхности сооружения* должен обеспечивать изгиб льда для его ломки, а не приводить к разрушению льда сжатием при контакте с ГТС. При этом должны быть выделены углы наклона сооружения, при которых невозможен изгиб льда.

1.2. Сумма изгибающих моментов, созданная приложенными силами при контакте льда с ГТС, должна превышать прочность сечения льда на изгиб, чтобы обеспечить его разрушение. При этом должны быть выделены параметры льда, при которых невозможно его *разрушение изгибом.*

2. Выполнение одного из условий с целью обеспечения окончательного разрушения льда изгибом при первом сдвиге ледового образования и уточнение первичных условий 1.1 и 1.2:

2.1. Должны быть обеспечены *условия для скольжения* статически изогнутого льда (в п.1). При этом проекционная сила N_z (созданная усилием льда Р) фрагмента льдины после разрушения изгибом (п.1) должна быть больше преодолеваемых сумм вертикальных сил [51].

2.2. Должны быть обеспечены *условия для вращения* фрагмента отломившегося льда вокруг точки контакта фрагмента с полем остального льда. При этом размеры фрагмента отломившегося льда должны оцениваться в безразмерном виде [51].

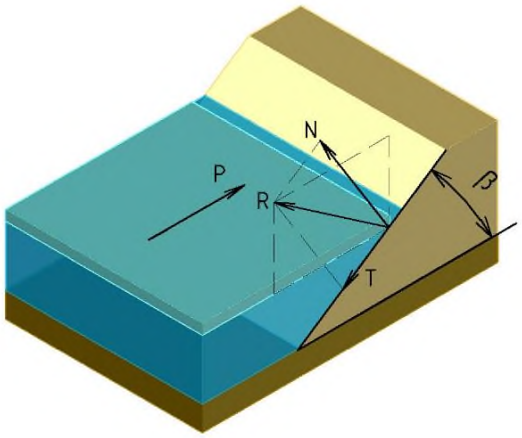
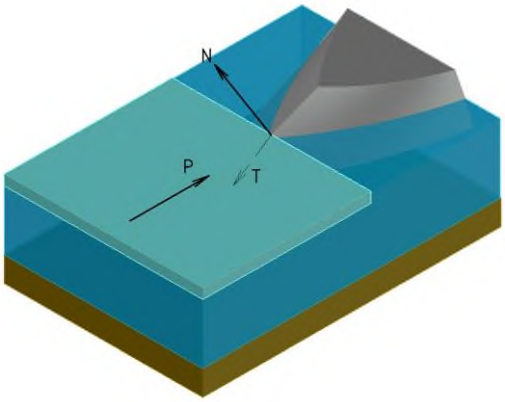
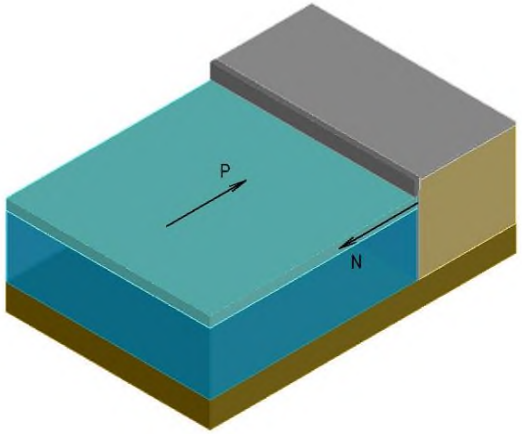
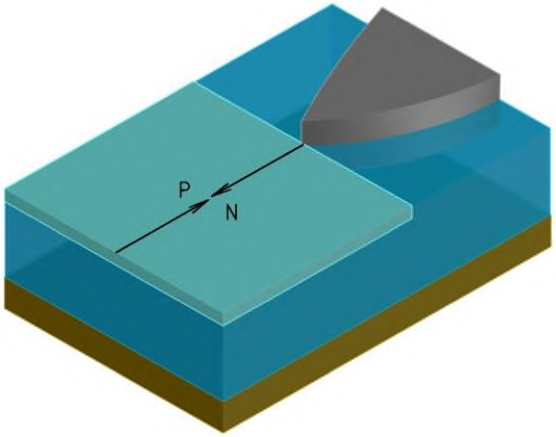
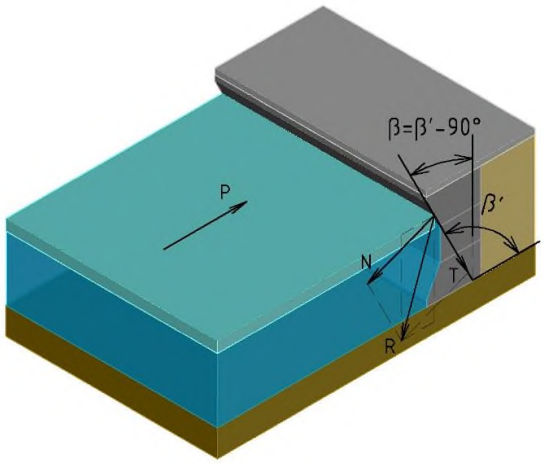
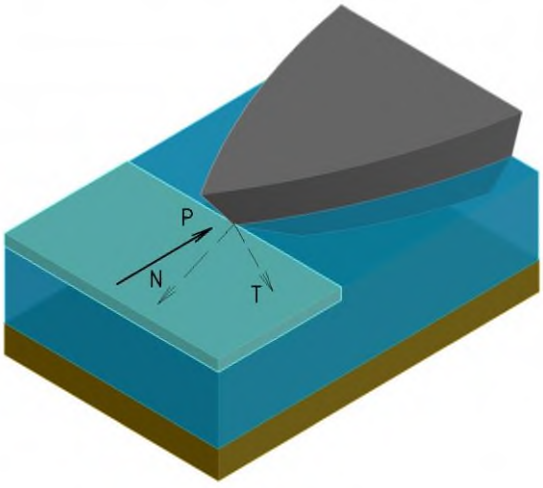
I) Остронаклонная поверхность (поверхность $\dot{+}$)	
изгиб вверх	разрез льда с изгибом вверх
	
II) Вертикальная поверхность (поверхность $\perp$)	
сжатие	разрез
	
III) Тупонаклонная поверхность (поверхность $\bar{-}$)	
изгиб вниз	разрез льда с изгибом вниз
	

Рисунок 2.4 Схема модели взаимодействия льда с ГТС

Для оценки необходимого угла наклона ГТС с целью создания изгиба для разрушения льда используем условие равновесия всех приложенных сил *(∑F=0)* и составим систему уравнений основных сил, создаваемых льдом на ГТС. При этом опустим очевидное равенство усилий для вертикальной стенки (см. рис. 2.4: случай II), а для наклонной поверхности запишем:

$$\begin{cases} N = \dfrac{P}{\sin(\beta) + \mu_k \cdot \cos(\beta)} \\ T = \mu_k \cdot N = \mu_k \cdot \dfrac{P}{\sin(\beta) + \mu_k \cdot \cos(\beta)} \end{cases}, \qquad (2.1)$$

где N, T – основные силы реакции и трения для остронаклонной поверхности с углом наклона β (рис. 2.4 *I*) и для тупонаклонной поверхности с углом наклона $\beta=\beta'-90°$ (рис. 2.4 *III*); β – угол наклона поверхности ГТС к воде, μ_k – коэффициент трения сооружения об лед, изменяющийся в диапазоне для стали 0,2…0,8, для бетона 0,07...0,14 в зависимости от влажного до сухого трения льда об ГТС.

Тогда проекции N и T в осях x, y, z имеют вид:

$$\begin{cases} N_x = N \cdot \sin(\beta) = \dfrac{P}{1 + \mu_k \cdot \operatorname{ctg}(\beta)} \\ N_y = 0 \\ N_z = N \cdot \cos(\beta) = \dfrac{P}{\tan(\beta) + \mu_k} \end{cases} \quad \begin{cases} T_x = T \cdot \cos(\beta) = \mu_k \cdot \dfrac{P}{\tan(\beta) + \mu_k} \\ T_y = 0 \\ T_z = T \cdot \sin(\beta) = \mu_k \cdot \dfrac{P}{1 + \mu_k \cdot \operatorname{ctg}(\beta)} \end{cases}, \qquad (2.2)$$

Из полученных уравнений видно, что воздействие льда на вертикальную стенку всегда будет больше, чем на наклонную поверхность с β максимально отличным от *90°* градусов.

При анализе системы уравнений (2.1) очевидно, что переход от наклонной стенки к вертикальной осуществляется в результате изменения угла β, и при приближении к *90°* градусам наступает разрыв функций, определявший условие невозможности изгиба льда. Поэтому установим границы, описывающие предельное условие, при котором лед разрушается изгибом или сжатием.

Обеспечение возможности изгиба льда при контакте с наклонной поверхностью ГТС выполнимо при условии, что сумма вертикальных сил R_z больше нуля $R_z > 0$, и тогда:

$$R_z = N_z - T_z = N \cdot \cos(\beta) - T \cdot \sin(\beta) > 0$$

$$R_z = \frac{P}{\sin(\beta) + \mu_k \cdot \cos(\beta)} \cdot \cos(\beta) - \mu_k \cdot \frac{P}{\sin(\beta) + \mu_k \cdot \cos(\beta)} \cdot \sin(\beta)$$

$$R_z = P \cdot \left(\frac{\cos(\beta) - \mu_k \cdot \sin(\beta)}{\sin(\beta) + \mu_k \cdot \cos(\beta)} \right)$$

В результате получим вертикальную результирующую силу в зависимости от усилия *P:*

$$R_z = P \cdot \frac{\left(\operatorname{ctg}(\beta) - \mu_k\right)}{\left(\operatorname{ctg}(\beta) \cdot \mu_k + 1\right)}. \qquad (2.3)$$

Из равенства видно, что если $\operatorname{ctg}(\beta) = \mu_k$, то вертикальная составляющая усилия окажется равной нулю, следовательно для обеспечения возможности разрушения льда изгибом необходимо создать условие $\operatorname{ctg}(\beta) > \mu_k$.

В таком случае угол наклона поверхности сооружения β при μ_k для наклонной поверхности согласно (2.2) будет лежать в следующих диапазонах:

для *остронаклонной поверхности* (β)

для стали: $\mu_k \in 0,2...0,8$; $\beta < 78,7°...51,3°$

для бетона: $\mu_k \in 0,07...0,14$; $\beta < 86,0°...82,0°$

для *тупонаклонной поверхности* (β')

для стали: $\mu_k \in 0,2...0,8$; $\beta' > 101,3°...128,7°$

для бетона: $\mu_k \in 0,07...0,14$; $\beta' > 94,0°...98,0°$

для условия существования «*вертикальной поверхности*» или разрушения льда сжатием, или будет обеспечивать диапазон углов наклона сооружения:

для стали: $\mu_k \in 0,2...0,8$; $78,7°...51,3° \le \beta \le 90° \le \beta' \le 101,3°...128,7°$

для бетона: $\mu_k \in 0,07...0,14$; $86,0°...82,0° \le \beta \le 90° \le \beta' \le 94,0°...98,0°$

В результате на основе формулы (2.3) получены границы перехода от остронаклонной поверхности к вертикальной стенке и к тупонаклонной

поверхности и выявлены диапазоны угла β, при котором возникает условие изгиба, необходимое для разрушения льда.

Для оценки условий разрушения сечения льда рассмотрим плоскую модель изгиба, происходящего под действием моментов, созданных проекциями сил N, T (приложенных на соответствующее им плечо по оси *x, z*) в начале разворота льдины вокруг центра вращения *O'* в плоскости *XoZ* до достижения предельной прочности сечения льда на изгиб $\sigma_{изг\ л}$. При этом сечение в месте излома сплошного льда имеет момент сопротивления W_y и для хрупкого разрушения; считаем, что перемещение по оси *z* фрагмента льда мало и сила веса фрагмента льдины равна поддерживающей силе Архимеда $G \approx F_a$. Тогда условие надлома льда для плоской модели в плоскости XoZ имеет вид:

$$N_z \cdot x - T_x \cdot z - T_z \cdot x - N_x \cdot z \geq \sigma_{изг\ л} \cdot W_y .$$

Поскольку изгиб льда в рассматриваемой задаче происходит по всей длине сооружения с наклонной поверхностью, предлагается использовать теоретическую формулу разрушения льда изгибом для полубесконечных пластин: $R_z = k \cdot \sigma_{изг\ л} \cdot h_л^{\,2}$, где k – коэффициент пропорциональности.

Однако (согласно формуле 2.3) R_z связано с горизонтальным усилием *P* при заданном угле β, поэтому можно приравнять зависимости и записать для усилия *P*:

$$P \geq \frac{k \cdot \sigma_{изг\ л} \cdot h_л^{\,2} \cdot \left(\operatorname{ctg}(\beta) \cdot \mu_k + 1\right)}{\left(\operatorname{ctg}(\beta) - \mu_k\right)}. \qquad (2.4)$$

Описанное формулой горизонтальное усилие *P* позволяет задать минимальное необходимое значение горизонтальной нагрузки, необходимое для начала разрушения льда изгибом. Но, к сожалению, после образования первых надломов и деформаций фрагмент льда условной длиной $L_ф$ может сохранить свое положение за счет вертикальных сил Архимеда и тяжести, которые будут пытаться удержать, в результате чего горизонтальное усилие *P* продолжит расти либо (1) до наступления предела прочности по сжатию или (2) до преодоления удерживающих сил, в результате чего лед продолжит разрушаться изгибом.

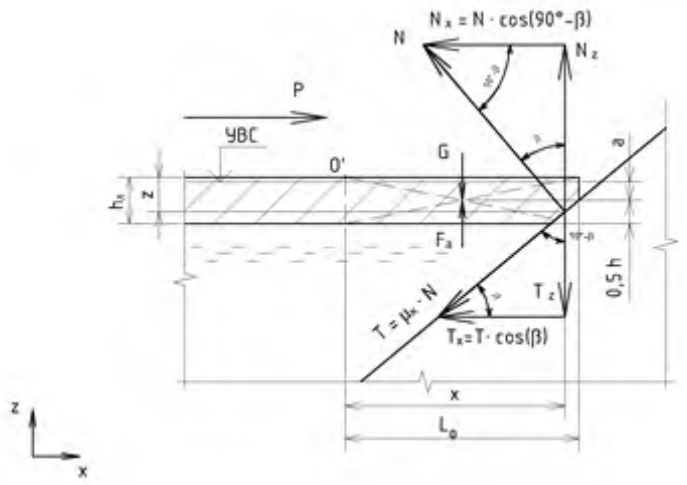
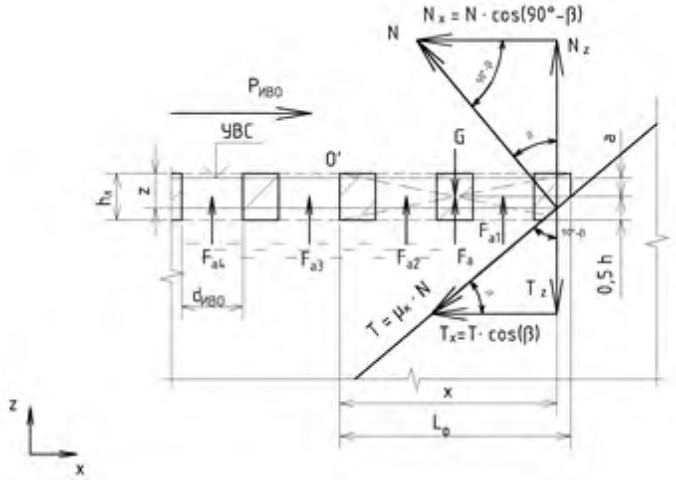
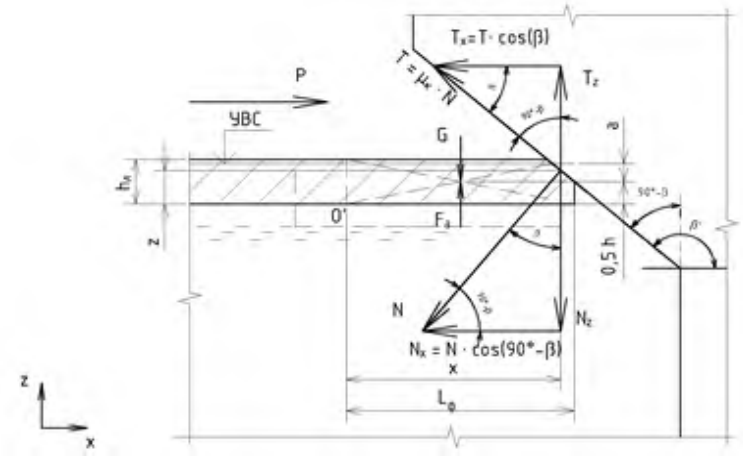
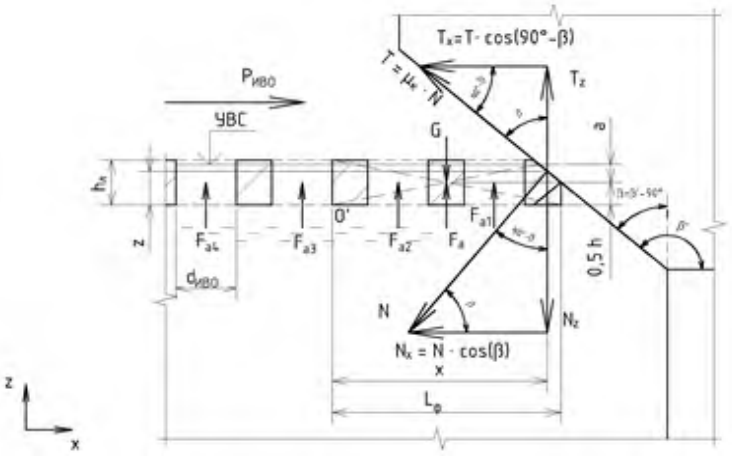
Вариант А-1. Сплошной лед с остронаклонной поверхностью	Вариант Б-1. Лед с ИВО с остронаклонной поверхностью
	
Вариант А-2. Сплошной лед с тупонаклонной поверхностью	Вариант Б-2. Лед с ИВО с тупонаклонной поверхностью
	

Рисунок 2.5. Схемы взаимодействия сплошного льда и льда с ИВО с остро- и тупонаклонными поверхностями ГТС

Для определения условий скольжения и вращения, необходимых для разрушения льда изгибом, рассмотрим условия изгиба льда 2.1-2.2 для четырех случаев: остро- и тупонаклонных поверхностей со сплошным льдом и льдом с ИВО в плоскости XoZ.

При определении условий скольжения и вращения фрагмента сплошного льда учитываются свойства льда, а также его геометрические параметры, приведенные к 1 погонному метру длины фронта контакта.

Вариант А. Сплошной лед с наклонной поверхностью.

Согласно исследованию ученых [51], для ГТС запишем условие скольжения и поворота в плоскости XoZ (рис. 2.6) для льдины, выведенной внешней нагрузкой из состояния статического равновесия:

скольжение:

$$N_z \geq G - F_a + T_z + T_л$$

поворот:

$$\begin{cases} N_z \geq G - F_a + T_z - T_л \\ N_z \cdot x + F_a \cdot \dfrac{x}{2} \geq T_x \cdot z + T_z \cdot x + N_x \cdot z + G \cdot \dfrac{x}{2} + T_л \cdot 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

где T_z, T_x – проекции силы трения льда о поверхность ГТС; N_z, N_x – проекции силы реакции N; $T_л$ – сила трения льда о лед в сечении излома, проходящего через центр вращения O'; F_a – сила Архимеда (выталкивающая сила фрагмента льда), G – сила тяжести фрагмента льда, действующая на пластину толщиной $h_л$ и длиной $L_ф$ и погруженной части льда $h_{п\,л}$, удерживаемой на плаву силой Архимеда, могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{cases} T_z = T \cdot \sin(\beta) = \mu_{dk} \cdot N \cdot \sin(\beta) \\ T_x = T \cdot \cos(\beta) = \mu_{dk} \cdot N \cdot \cos(\beta) \\ T_л = \mu_л \cdot N_x = \mu_{dл} \cdot N \cdot \sin(\beta) \\ N_z = N \cdot \cos(\beta);\ N_x = N \cdot \sin(\beta) \\ G = \rho_л \cdot g \cdot L_ф \cdot h_л;\ F_a = \rho_в \cdot g \cdot L_ф \cdot h_{п\,л} \end{cases},$$

В этой системе μ_{dk}, $\mu_{dл}$ – динамические коэффициенты трения льда о сооружение и об лед соответственно, а F_a по мере выталкивания льдины будет стремиться к нулю, при этом сила тяжести (за счет снижения F_a) будет наоборот оказывать большее влияние. Таким образом, разность $G - F_a$ может меняться от нуля в точке покоя (погруженная часть льдины равна $h_{п\,л}$) до значения G при выходе льда из воды (погруженная часть льдины равна нулю *($h_{п\,л}$ – var: 1->0)*). Обозначим величину $g \cdot L_ф \cdot \left(\rho_л \cdot h_л - \rho_в \cdot h_{п\,л}\right) = M_B$, в результате получим:

для условия скольжения (из *∑F=0* системы 2.5) найдем необходимый угол β*:*

$$\operatorname{ctg}(\beta) \geq \mu_{dк} + \mu_{dл} + \frac{M_B}{N \cdot \sin(\beta)},$$

для условия вращения вокруг точки *O'* (из *∑M*=0 системы 2.5) найдем размер вращающегося фрагмента $L_ф/h_л$. Для простоты записи предположим, что $x \to L_ф$, $z \to \frac{h_л}{2} \cdot \left(1 + \cos(\beta)\right)$, тогда:

$$\operatorname{ctg}(\beta) \geq \mu_{dk} \cdot \operatorname{ctg}(\beta) \cdot \frac{h_л \cdot \left(1 + \cos(\beta)\right)}{2 \cdot L_ф} + \mu_{dk} + \frac{h_л \cdot \left(1 + \cos(\beta)\right)}{2 \cdot L_ф} + \frac{M_B}{N \cdot \sin(\beta)} \cdot \frac{1}{2},$$

выразив $\frac{M_B}{N \cdot \sin(\beta)}$ из условия равенства сил для сценария вращения

$\frac{M_B}{N \cdot \sin(\beta)} \leq \operatorname{ctg}(\beta) - \mu_{dк} - \mu_{dл}$ и подставив в вышеприведенное уравнение, получим:

$\frac{L_ф}{h_л} \geq \frac{(1 + \cos(\beta)) \cdot \left(\mu_{dk} \cdot \operatorname{ctg}(\beta) + 1\right)}{\operatorname{ctg}(\beta) - \mu_{dk} + \mu_{dл}}$ – таким образом, полученная зависимость позволяет получить предельно допустимые размеры фрагмента льда для продолжения разрушения изгибом (рис. 2.7).

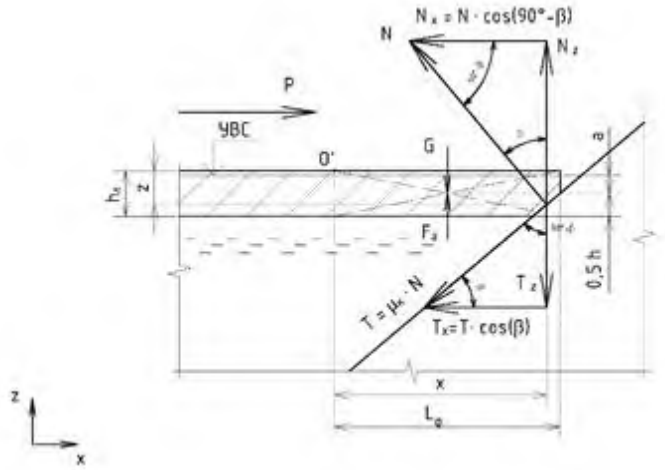
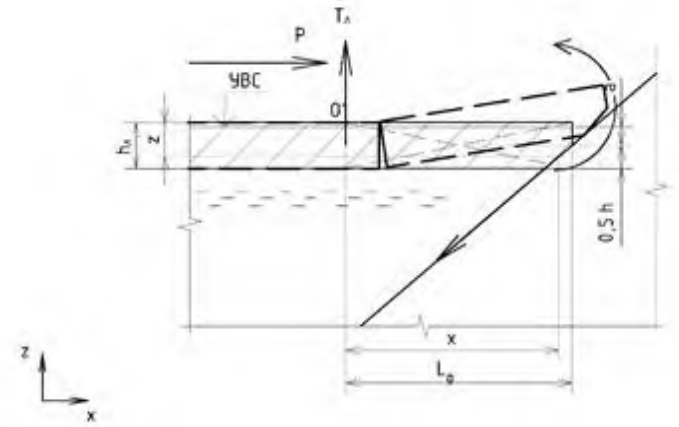
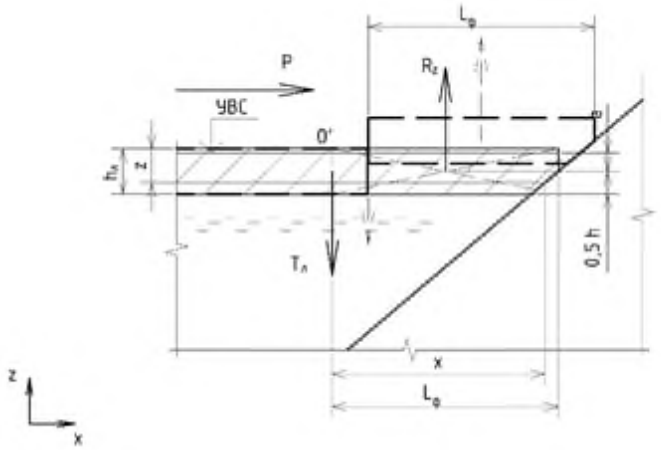
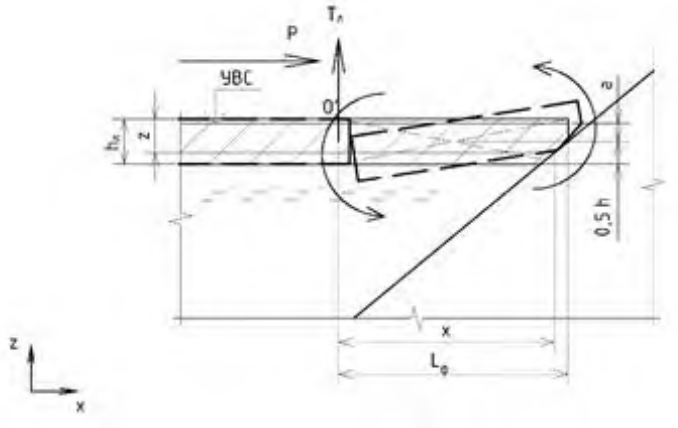
Вариант А-1. Сплошной лед с остронаклонной поверхностью	Вариант А-1. Условие вращения при $T_л > M_B$
	
Вариант А-1. Условие скольжения	Вариант А-1. Условие вращения при $T_л < M_B$
	

Рисунок 2.6. Взаимодействия сплошного льда с остронаклонной поверхностью ГТС. Условия скольжения и вращения

Таким образом, выполнение условий скольжения или вращения с целью обеспечения полного разрушения льда изгибом для случая острого наклона поверхности ГТС с учетом предельно допустимых границ значения угла β (полученных ранее) описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \operatorname{ctg}(\beta) \geq \mu_{dк} + \mu_{dл} + \dfrac{M_B}{N \cdot \sin(\beta)} \rightarrow \dfrac{M_B + P \cdot \mu_{dл} + P \cdot \mu_{dк}}{P - M_B \cdot \mu_k} \\ \left[\begin{array}{l} \textit{ИЛИ } \operatorname{ctg}(\beta) \geq \mu_{dк} - \mu_{dл} + \dfrac{M_B}{N \cdot \sin(\beta)} \rightarrow \dfrac{M_B - P \cdot \mu_{dл} + P \cdot \mu_{dк}}{P - M_B \cdot \mu_k} \\ \text{при } \dfrac{L_ф}{h_л} \geq \dfrac{(1+\cos(\beta)) \cdot \left(\mu_{dk} \cdot \operatorname{ctg}(\beta) + 1\right)}{\operatorname{ctg}(\beta) - \mu_{dk} + \mu_{dл}} \end{array} \right. \\ \sigma_{сж\ л} \cdot h_л \geq P \end{cases}, \qquad (2.6)$$

при этом $\operatorname{ctg}(\beta)$ уточняется на основе того случая, который наступил раньше (вращение или скольжение).

Система уравнений (2.6) действительна для всех случаев наклонной поверхности при перемещениях не более $w_z \leq \left(1 - \dfrac{\rho_л}{\rho_в}\right) \cdot h_л$, (но достаточных для вывода из равновесия), при которых результирующая сила M_B не превышает разницу между полной F_a,, действующей на всю толщину льда $h_л$, и силой тяжести G.

При перемещениях $w_z > \left(1 - \dfrac{\rho_л}{\rho_в}\right) \cdot h_л$ предельное значение результирующей силы для остронаклонной поверхности M_{+B}будет расти и стремиться к G до тех пор, пока льдина полностью не вылезет или же не разрушится изгибом повторно. Для тупонаклонной поверхности предельное значение M_{-B} окажется равной разности между полной силой Архимеда и силой тяжести и составит $M_{-B} = \rho_в \cdot g \cdot \left(1 - \dfrac{\rho_л}{\rho_в}\right) \cdot h_л$. При этом поскольку верхний предел возможного значения M_{+B} больше M_{-B}, то с учетом наступления предела прочности на изгиб

фрагмента льда возможны изменения значений $L_ф$ как в большую, так и в меньшую сторону. Такой сценарий продолжения ломки льда изгибом в настоящей работе автором не рассматривается.

На основании системы уравнений 2.6 для льда толщиной 1 м составим график зависимости $L_ф$ от угла β, динамическими коэффициентами трения льда о лед и льда о поверхность ГТС $\mu_{dk} = \mu_{dл} = 0{,}1$ для стали со статическим коэффициентом трения $\mu_k = 0{,}3$:

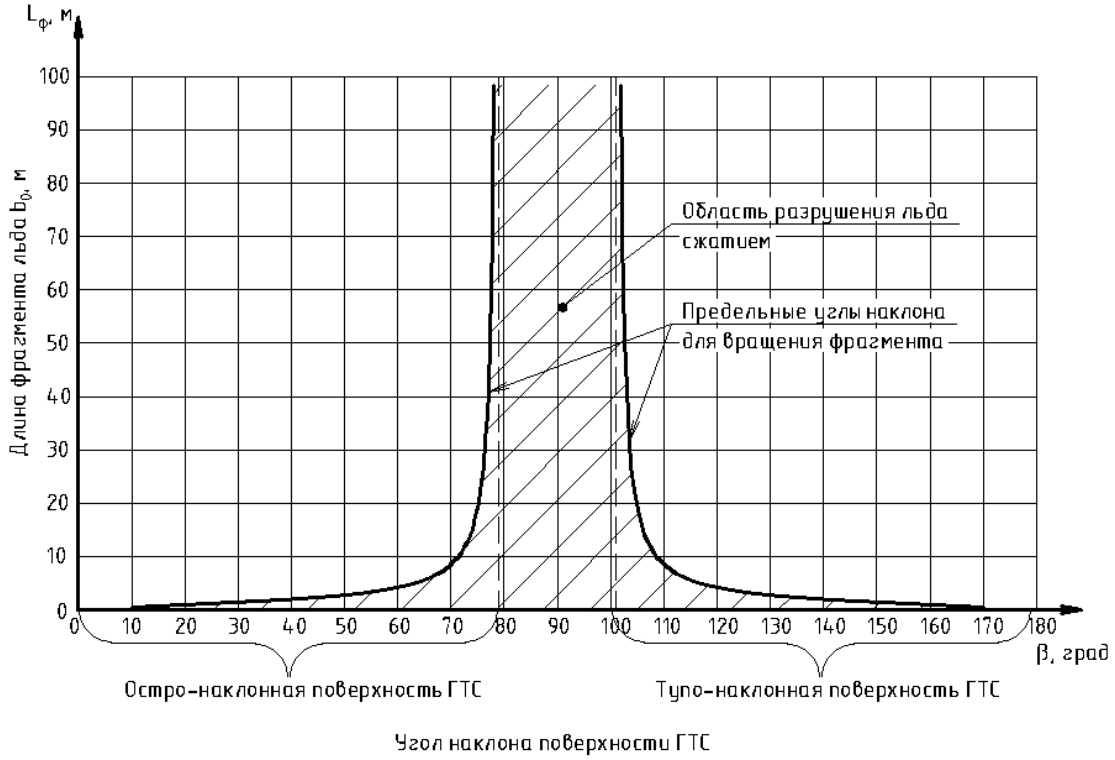


Рисунок 2.7. График зависимости размера фрагмента $L_ф$ от угла наклона поверхности ГТС β

Из графика можно выделить, что при соблюдении полученных значений $L_ф$ при угле β обеспечивается наступление случая вращения фрагмента льда (при условии, что вращение наступает раньше скольжения), а не его разрушение сжатием. При приближении угла наклона поверхности ГТС к вертикальному значению можно заметить, что для обеспечения вращения размер фрагмента также растет. Это обуславливается тем, что с учетом ограничений сил на сжатие в

системе (2.6), необходимо обеспечить большее плечо до точки вращения О’ для достижения необходимого момента вращения *M*.

На основе уравнения вращения (из системы уравнений (2.6)) выразим горизонтальное усилие *P*, необходимое для обеспечения условий скольжения или вращения с целью дальнейших сравнений

$$P \geq \frac{M_B\left(1+\mu_k \cdot \operatorname{ctg}(\beta)\right)}{\operatorname{ctg}(\beta)-\mu_{dк} \pm \mu_{dл}}, \tag{2.7}$$

где для скольжения применяется «-», а для вращения «+».

При использовании ИВО как способа ослабления льда необходимо учесть ряд параметров взаимодействия льда и материала шарика [52], таких как коэффициент адгезии, плотность (плавучесть). Перепишем уравнения (2.4-2.7) с учетом включения ИВО в ледовый покров для каждого из случаев наклона поверхности с учетом, что $P_{ИВО}$ – горизонтальное усилие, необходимое для разрушение льда с ИВО, прочностью $\sigma_{изг\ ИВО}$, отличной от прочности чистого льда $\sigma_{изг\ л}$ (за счет влияния на лед через поры, созданные ИВО), и равно $P_{ИВО} = k_P \cdot P$ $F_{a\ ИВО} = \sum_1^n F_{a\,n}$, $G_{ИВО} = \sum_1^n F_{g\,n}$,где k_P – коэффициент пропорциональности; n – число ИВО в сечении льда до условной точки слома *O’,* а при расчете плеча *x* принимается, что равнодействующая сила находится в середине фрагмента.

Тогда минимальное необходимое значение горизонтальной нагрузки, необходимое для обеспечения условия вращения $P_{ИВО}$, составит:

$$P_{ИВО} \geq \frac{k \cdot \sigma_{изг\ ИВО} \cdot h_л^{\,2} \cdot \left(\operatorname{ctg}(\beta) \cdot \mu_k + 1\right)}{\left(\operatorname{ctg}(\beta) - \mu_k\right)}. \tag{2.8}$$

Вариант Б. Лед с ИВО с наклонной поверхностью.

Согласно системе уравнений (2.6) уточним условие скольжения (вылезание льдины) и поворота в плоскости XoZ с учетом ИВО.

скольжение:

$$N_z \geq \left(G + G_{иво}\right) - \left(F_a + F_{a\ ИВО}\right) + T_z + T_л$$

поворот:

$$\begin{cases} N_z \geq \left(G + G_{иво}\right) - \left(F_a + F_{a\ ИВО}\right) + T_z - T_л \\ N_z \cdot x + \left(F_a + F_{a\ ИВО}\right) \cdot \dfrac{x}{2} \geq T_x \cdot z + T_z \cdot x + N_x \cdot z + \left(G + G_{иво}\right) \cdot \dfrac{x}{2} + T_л \cdot 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

где $M_{В\ ИВО}$ – результирующая сила силы Архимеда и силы тяжести с учетом ИВО, $M_{В\ ИВО} = \left(G + G_{иво}\right) - \left(F_a + F_{a\ ИВО}\right)$,

тогда первичное полное разрушение льда изгибом с учетом начальных границ угла β:

$$\begin{cases} \operatorname{ctg}(\beta) \geq \mu_{dк} + \mu_{dл} + \dfrac{M_{В\ ИВО}}{N \cdot \sin(\beta)} \rightarrow \dfrac{M_{В\ ИВО} + P_{ИВО} \cdot \mu_{dл} + P_{ИВО} \cdot \mu_{dк}}{P_{ИВО} - M_{В\ ИВО} \cdot \mu_k} \\ \left[\begin{array}{l} ИЛИ\ \operatorname{ctg}(\beta) \geq \mu_{dк} - \mu_{dл} + \dfrac{M_{В\ ИВО}}{N \cdot \sin(\beta)} \rightarrow \dfrac{M_{В\ ИВО} - P_{ИВО} \cdot \mu_{dл} + P_{ИВО} \cdot \mu_{dк}}{P_{ИВО} - M_{В\ ИВО} \cdot \mu_k} \\ \text{при } \dfrac{L_ф}{h_л} \geq \dfrac{(1 + \cos(\beta)) \cdot \left(\mu_{dk} \cdot \operatorname{ctg}(\beta) + 1\right)}{\operatorname{ctg}(\beta) - \mu_{dk} + \mu_{dл}} \end{array} \right. \\ \sigma_{сж\ ИВО} \cdot h_л \geq P_{ИВО} \end{cases} . \quad (2.10)$$

В результате сравнения систем уравнений чистого льда (2.6) и льда с ИВО (2.10) при перемещениях не более $w_z \leq \left(1 - \dfrac{\rho_л}{\rho_в}\right) \cdot h_л$ можно выявить, что условие вращения фрагмента льда с ИВО размерами $L_ф$ соответствует результатам и графику (рис. 2.7) при одинаковых углах β. Однако следует заметить, что наступление случая вращения фрагмента или же его разрушение сжатием в результате различий в прочностных характеристиках чистого льда $\sigma_л$ и льда с

ИВО (рассматривая его как единый композитный материал) $\sigma_{ИВО}$, происходит при различных горизонтальных усилях *P*.

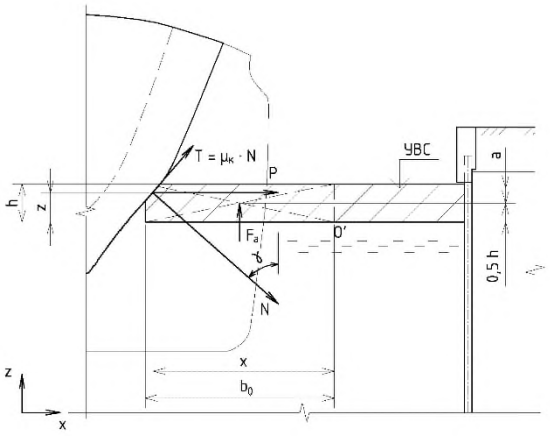
Необходимое горизонтальное усилие при достижении полного разрушения льда с ИВО изгибом составит:

$$P_{ИВО} \geq \frac{M_{В\ ИВО}\left(1+\mu_k \cdot \mathrm{ctg}(\beta)\right)}{\mathrm{ctg}(\beta)-\mu_{dк} \pm \mu_{dл}}, \qquad (2.11)$$

где для скольжения применяется «-», а для вращения «+».

Также следует отметить, что системы уравнений, описывающие схемы *с* тупонаклонной поверхностью, применимы для частного сценария, при котором судно (наклонная поверхность) сближается с ГТС, имеющими вертикальную поверхность.

Судно-сплошной лед-ГТС



Судно-лед с ИВО-ГТС

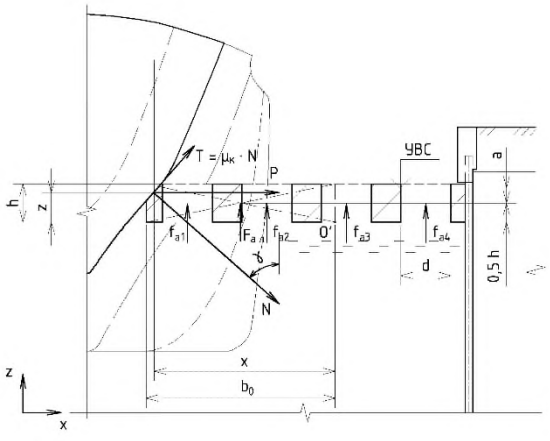


Рисунок 2.8. Схема взаимодействия корпуса судна со сплошным льдом и льдом с ИВО (передача усилий через лед на ГТС)

И, таким образом, можно оценить горизонтальное усилие *P*, полученное в результате воздействия корпуса судна и переданное через лед на ГТС.

Анализируя полученные формулы для случаев остро- и тупонаклонных поверхностей (2.4-2.11), можно сделать заключение, что для ослабления льда предлагаемой технологией большое значение имеет выбор правильных свойств материала.

В случае обеспечения минимально необходимого значения горизонтальной нагрузки, требуемого для начала разрушения льда изгибом, в сравнении чистого

льда и льда с ИВО, ключевым будет прочность рассматриваемого случая льда на изгиб, что подтверждается отношением 2.4 и 2.8:

$$\frac{P_{ИВО}}{P} \geq \frac{\sigma_{изг\ ИВО}}{\sigma_{изг\ л}}. \tag{2.12}$$

В свою очередь для обеспечения условий скольжения или вращения льда раскроем силы Архимеда и тяжести для ИВО и получим: в случае выталкивающей силы $F_{a\,n} = k_{Ad} \cdot \rho_{в} \cdot g \cdot V_{n\,ИВО}$, а силы тяжести – $F_{g\,n} = k_{Ad} \cdot \rho_{ИВО} \cdot g \cdot V_{ИВО}$. Таким образом, можно сделать предположение, что в случае льда с ИВО за счет плотности вмороженных объектов можно оказывать значительное влияние на горизонтальное усилие *P*, необходимое при разрушении льда изгибом о наклонную поверхность ГТС путем влияния на M_B.

Рассмотрим соотношение усилий *P* и $P_{ИВО}$ через отношения уравнений 2.7 и 2.11, подставив в него параметры льда, геометрии ИВО и, раскрыв формулы $F_{a\,n} = k_{Ad} \cdot \rho_{в} \cdot g \cdot V_{n\,ИВО}$ и $F_{g\,n} = k_{Ad} \cdot \rho_{ИВО} \cdot g \cdot V_{ИВО}$, получим:

$$\frac{P_{ИВО}}{P} \geq 0,215 + \frac{k_{Ad} \cdot 0,785 \cdot \left(\rho_{ИВО} \cdot h_{ИВО} - \rho_{в} \cdot h_{n\,ИВО}\right)}{\left(\rho_{л} \cdot h_{л} - \rho_{в} \cdot h_{n\,л}\right)}. \tag{2.13}$$

где k_{Ad} - безразмерный коэффициент адгезии материала, характеризующий степень проникновения одного вещества в другое в процессе замораживания (приложение 2).

Стоит заметить, что в результате сравнения между собой случаев наклонных поверхностей со сплошным льдом и льдом с ИВО горизонтальное усилие *P* и $P_{ИВО}$ характеризуется результирующими силами M_B и $M_{B\,ИВО}$ соответственно.

В сравнении с чистым льдом при разрушении льда с ИВО изгибом для уменьшения силы $M_{B\,ИВО}$ в случае остронаклонной поверхности следует уменьшать плотность $\rho_{ИВО}$ ИВО, в результате чего при формировании ледового покрова может получится так, что ИВО не окажется вмороженным в лед (либо будет слишком больших размеров $h_{ИВО}$). А для случая тупонаклонной

поверхности, наоборот, следует задавать плотность ИВО $\rho_{ИВО}$, близкое к плотности воды, считая, что положение ИВО воде $\Delta h_{ИВО} = \left(1 - \frac{\rho_{ИВО}}{\rho_в}\right) \cdot h_{ИВО}$.

Исходя из этих рассуждений в первом приближении плотность ИВО необходимо рассматривать равной плотности льда. В таком случае суммарные силы *G* и F_a для случаев остро- и отрицательных наклонных поверхностей будут равны, и в большей степени влияние ИВО на ледовый покров будет оказывать через адгезионный коэффициент k_{Ad}.

Преобразуем формулы исходя из частного случая, при котором $\rho_{ИВО} \approx \rho_л$, $h_{ИВО} \approx h_л$, тогда для всех случаев:

$$\frac{P_{ИВО}}{P} \geq 0,785 \cdot k_{Ad} + 0,215. \qquad (2.14)$$

Исходя из упрощенной записи видно, что варьирование адгезионного коэффициента k_{Ad} в диапазоне от 0…1, создает ослабление сечения путем уменьшения ширины льда, работающего на изгиб. Иными словами, при обеспечении плавучести приблизительно равной плавучести льда из гидрофобного материала, получится ослабленный перфорированный лед с прочностными характеристиками много ниже сплошного льда за счет снижения эффективной площади сечения льда.

Поскольку для точных вычислений по формуле 2.12 необходимо решить сложную пространственную геометрическую задачу по взаимодействию чистого льда и перфорированного льда с помощью ИВО (с применением уравнения малого изгиба пластины на упругом основании $D \cdot \nabla^4 \cdot w + \rho \cdot g \cdot w = q(x, y)$) с наклонными поверхностями, а также для подтверждения зависимости (2.13, 2.14) и выводов, сформулированных автором настоящего исследования, было принято решение о проведении эксперимента.

Выводы по Главе 2

1. Опыт эксплуатации причалов и портов в условиях Крайнего Севера подтверждает существование проблемы надежности эксплуатации и соблюдения сроков безаварийной эксплуатации гидротехнических сооружений на закрытых акваториях портов. Нарушение устойчивого функционирования морских портов арктических регионов вызвано не только ледовой обстановкой, но и дополнительными усилиями, которые передаются через лед, в частности при внешних воздействиях, столкновении с ледовыми образованиями или при швартовке и/или движении судов ледового класса.

2. Приводится описание предлагаемой новой технологии снижения передаваемых через ледовый покров нагрузок на гидротехнические сооружения , путем уменьшения прочностных характеристик льда за счет перфорации льда с помощью ИВО, которые размещаются на закрытых акваториях портов.

3. По результатам исследования взаимодействия ледового поля с различными поверхностями ГТС были получены зависимости, определяющие предельные углы наклона стенки сооружения и минимальные горизонтальные усилия (при выбранном угле наклона поверхности ГТС), при которых возможны выполнения первичных разрушений льда изгибом (надлом и вывод из равновесия), а также получены формулы расчета горизонтальных усилий, обеспечивающих полное разрушения льда изгибом (вращение или притапливание/подьем).

4. Получены теоретические зависимости, подтверждающие возможность снижать нагрузку на ГТС с помощью предлагаемой технологии.

5. Сформулированы выводы о влиянии материала и свойств ИВО на прочностные характеристики льда и на передаваемые усилия через лед на ГТС.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК СПЛОШНОГО ЛЬДА И ПЕРФОРИРОВАННОГО ЛЬДА С ПОМОЩЬЮ ИВО НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ ПРИ ШВАРТОВКЕ СУДОВ ЛЕДОВОГО КЛАССА

Для получения экспериментальных данных по уменьшению горизонтального усилия, созданного первыми подвижками ледовых образований, или при сценарии передачи через лед на ГТС внешних усилий (при сближении судов ледового класса или при столкновении с другими льдинами), были проведены в полевых условиях модельные исследования ледовых образований в уменьшенном масштабе (с учетом рекомендаций МАГИ). Условия и порядок проведения эксперимента и его результаты представлены в виде сводной базы (таблицы), а сами полученные экспериментальные данные были проанализированы и обработаны методом наименьших квадратов для получения представленных в данной главе расчетных зависимостей.

Также в главе представлены лабораторные испытания по движению судна через модельный перфорированный лед с помощью ИВО. Исследование проводилось с целью определения влияния прохождения судна на первоначальное расположение ИВО, что позволит в дальнейшем оценить эффективность предлагаемой технологии.

Основные результаты главы представлены в следующих работах автора [53], [54].

3.1. Экспериментальные исследования прочности клавиш сплошного льда и льда с ИВО

3.1.1. Цели и задачи полевого эксперимента

Целью полевого экспериментального исследования предлагаемой технологии является доказательство верности теории и формул (2.13-2.15) и оценка эффективности применения ИВО, а также получение исходных данных для создания численной модели главы 5, с последующим сравнением с экспериментальными данными. Поскольку максимальная величина горизонтального усилия (сжатие), передающегося на ГТС, определяется моментом полной ломки льда от действия вертикальных усилий (изгиб), и связана с ними через угол наклона поверхности (2.1, 2.2), в эксперименте предлагается исследовать прочность чистого льда и льда с ИВО на изгиб, согласно общепринятым методикам [55], [56], [57], [58].

Для экспериментальной проверки гипотезы автора по использованию ИВО полубесконечная пластина льда, описанная в главе 2, представлена в виде конечной балки, подверженной изгибу. Кроме того, время момента излома конечной балки выбрано для определения времени завершения единичного силового воздействия льда на ГТС. Применение в эксперименте этих упрощений позволит оценить снижение нагрузок на ГТС.

Экспериментальные исследования по снижению прочности ледовых образований с помощью ИВО в открытых источниках найти и сравнить с нашими результатами не удалось, поэтому считаем, что данные исследования проводились впервые, при этом за основу были взяты общепринятые методики проведения подобных исследований для клавиш сплошного льда.

Согласно [55], как в лабораторных, так и в полевых условиях, для испытания льда на изгиб применяются три основных техники измерения основных величин, входящих в зависимости [59]:

$$\begin{cases} \sigma_{изг} = \dfrac{M_y}{W_y} \\ M_y = \int F dL \\ W_y = \dfrac{I_y}{x_{макс}} = \dfrac{1}{x_{макс}} \int_A x^2 dA, \end{cases} \quad , \qquad (3.1)$$

где M_y – изгибающий момент; W_y – момент сопротивления сечения; F – сила; L – расстояние; I_y – момент инерции сечения; $x_{макс}$ – проекция на ось X наиболее удаленной точки сечения в перпендикулярной оси (Y); A – площадь сплошного сечения.

Приведем три основных техники измерений для исследуемых образцов прямоугольных и круглых форм для оценки разрушения на изгиб:

Разрушение балки льда, свободно лежащей на 2х опорах. В этом способе вырезается образец, устанавливается на две опоры, после чего создается нагрузка посередине. При таком способе расчет прочности σ на изгиб производится с использованием зависимости:

$$\sigma_{изг} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot B \cdot h^2},$$

где F - разрушающая нагрузка; L - расстояние между опорами; B и h - ширина и толщина (высота) балки.

Разрушение круговой ледяной пластины, свободно лежащей на кольцевой опоре - наиболее распространенная техника из-за простоты выпиливания образцов. Образец вырезается кольцевым буром, после чего устанавливается на опору и нагружается в центре. Расчет прочности $\sigma_{изг}$ на изгиб производится согласно зависимости:

$$\sigma_{изг} = \frac{3 \cdot F}{2 \cdot \pi \cdot \mu_n \cdot h^2} \cdot \left[\mu_n + (\mu_n + 1) \cdot \ln \frac{r}{r_0} - (\mu_n - 1) \cdot \frac{r_0}{4 \cdot r^2} \right],$$

где μ_n - величина, обратная коэффициенту Пуассона (μ_n >> 3); h - толщина пластины; r - рабочий радиус пластины (внутренний радиус кольцевой опоры); r_o- радиус распределения нагрузки ("пятна" создания нагрузки).

Основным недостатком 1-го и 2-го способов является извлечение образца из природной среды и помещение в искусственные (лабораторные) условия. Поэтому при испытании льда на изгиб наиболее часто применяют 3й способ, который использован в данной работе для сравнительного анализа изгиба сплошного льда и льда с ИВО.

Разрушение консолей (клавиш) сплошного льда. Изо льда выпиливается прямоугольная балка, один конец которой закрепляется; а второй – нагружается. Разница двух возможных вариаций этого метода заключается в том, что можно выпилить балку и закрепить её в лаборатории или же вырезать клавишу в поверхности льда таким образом, что один конец будет закреплен непосредственно в ледяном поле. Расчет прочности на изгиб $\sigma_{изг}$ для равномерного прямоугольного сечения имеет вид:

$$\sigma_{изг} = \frac{M_y}{W_y} = \frac{6 \cdot N_z \cdot L_x}{B_л \cdot h_л^{\,2}}, \qquad (3.2)$$

где N_z – вертикальная нагрузка, L_x – расстояние от линии действия нагрузки до линии закрепления консоли в первом варианте или до линии слома (см. рис. 3.3), $B_л$ – ширина образца, $h_л$ – толщина льда.

Для льда с ИВО расчет $\sigma_{изг}$ выполнялся по (3.1), где момент сопротивления сечения производился в соответствии с [59] в программном комплексе AutoCAD для сечения, представленного на рисунке 3.1. В остальном методика проведения исследований аналогична.

$$W_{y\,ИВО} = \frac{B_л h_л^{\,2}}{6} - k_{Ad} \cdot n \cdot W_{ИВО}, \qquad (3.3)$$

где $W_{y\,ИВО}$ − момент сопротивления сечения льда с ИВО с учетом вычета площади сегмента $W_{ИВО}$; n – количество ИВО в сечении, приходящихся на ширину $B_л$.

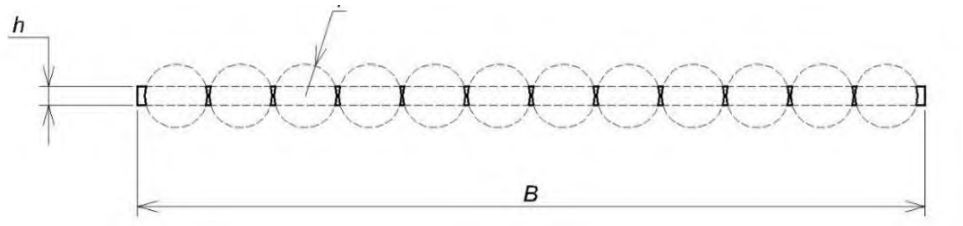


Рисунок 3.1. Схема составного сечения

Упростим общее уравнение моментов созданных силами, описанное в главе 2:

$$N_z \cdot x - T_z \cdot x - F_a \cdot \frac{x}{2} - N_x \cdot z - T_x \cdot z + G \cdot \frac{x}{2} \geq \sigma_{изг} \cdot W_y,$$

для клавиш из чистого льда, используемых в эксперименте:

$$M_y \geq N_z \cdot x + M_B \cdot \frac{x}{2} \geq \sigma_{изг} \cdot W_y,$$

$$N_z \geq \frac{\sigma_{изг} \cdot W_y - M_B \cdot \frac{x}{2}}{x}, \tag{3.4}$$

для клавиш льда с ИВО:

$$N_{z\,ИВО} \geq \frac{\sigma_{изг\,ИВО} \cdot W_{y\,ИВО} - M_{B\,ИВО} \cdot \frac{x}{2}}{x}, \tag{3.5}$$

где x - в случае проводимого эксперимента предполагается как L_p или L, а $\sigma_{изг\,ИВО} = \sigma_{изг}$ - из предположения, что раздельные ИВО влияют непосредственно на сечение клавиши W_y и результирующую силу M_B, при этом прочность льда как материала сохраняется.

3.1.2. Проведение полевого эксперимента

Эксперимент по определению прочности на изгиб иррегулярно плавающих, вмерзших в лед объектов проведен в Санкт-Петербурге, на озере Лахта, 20–21 марта 2016 г., 8–9 февраля 2017 г., 9–16 декабря 2021 г. Место проведения испытаний: 60,0000 СШ, 30,1868 ВД. На ледовой поверхности озера выполнен разрез льда прямоугольной формы длиной 7,5 м, шириной 1,9 м (рис. 3.2).

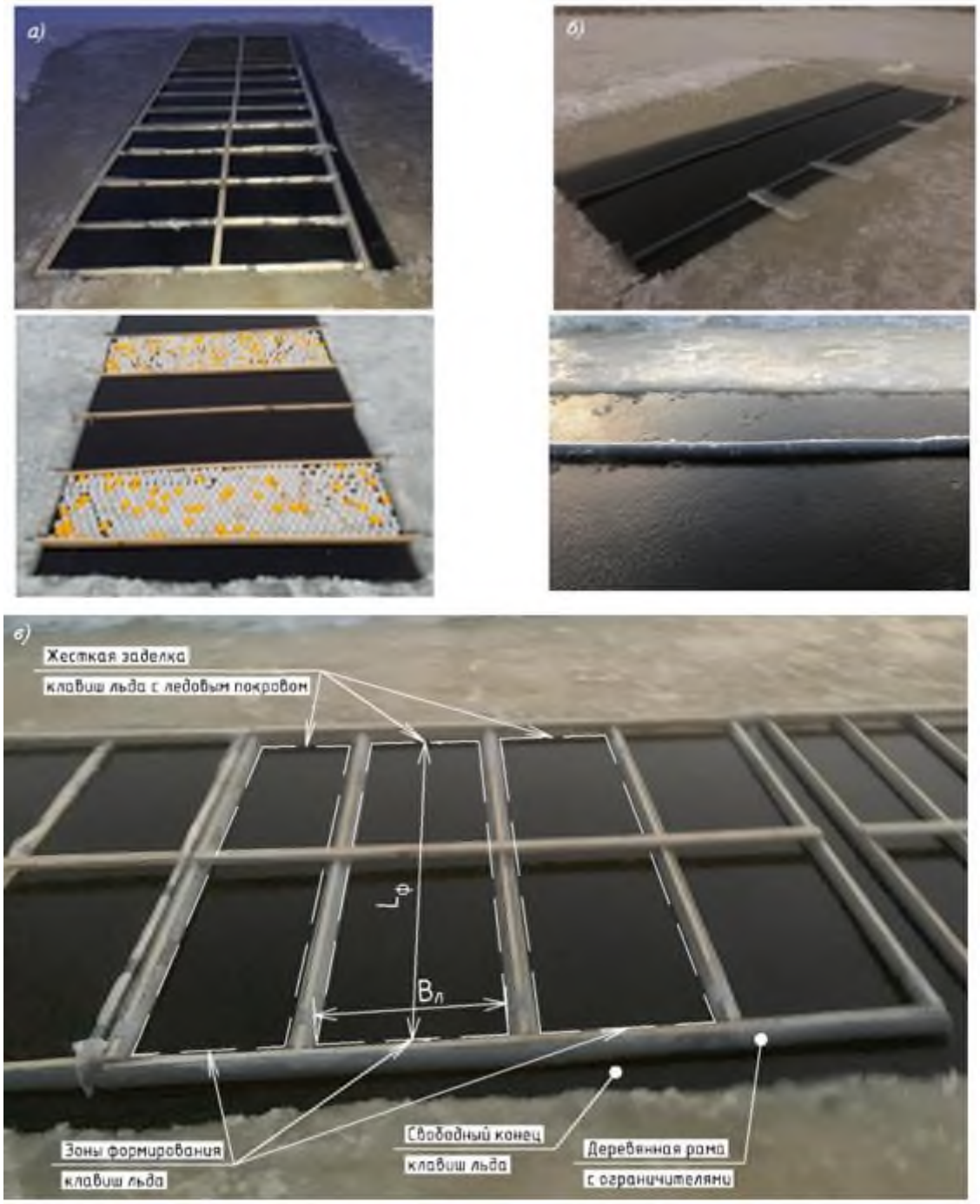


Рисунок 3.2. Испытательный полигон прямоугольной формы, вырезанный во льду:
а – испытание клавиш длиной до 1,72 м; б – испытание клавиш длиной до 7 м;
г – описание полигона

Толщина ледового покрова на озере не превышала 45 см. Выбранный участок освобождался ото льда для последующей установки в нем ограничителей, делящих поверхность воды на прямоугольные фрагменты разной ширины B,

изменяемой в диапазоне значений 25,5–50 см. Часть ограничителей оставалась незаполненной, часть заполнялась пластмассовыми, а часть – полиуретановыми шариками (ИВО), создавая два типа исследуемых клавиш (рис. 3.3). Для возможности дальнейшего сравнения сплошные клавиши и клавиши с ИВО формировались одновременно, при одинаковых внешних условиях. Клавиши с ИВО разделялись на два вида: в первом случае применялись полые внутри шарики диаметром 40 мм, к которым крепился специальный груз для их погружения в воду наполовину (ИВО½), с высоким показателем коэффициента адгезии; во втором случае использовались сплошные шарики диаметром 40 мм, которые были на 2/3 погружены в воду (плотность шариков 650, ИВО⅔) и имели коэффициент адгезии стремящийся к нулю. Сила сцепления (коэффициент адгезии) в эксперименте обеспечивалась за счет подбора специальных материалов: для ИВО½ применялся негидрофобный материал с шероховатой поверхностью, а для ИВО⅔, наоборот, гидрофобный с гладкой поверхностью.

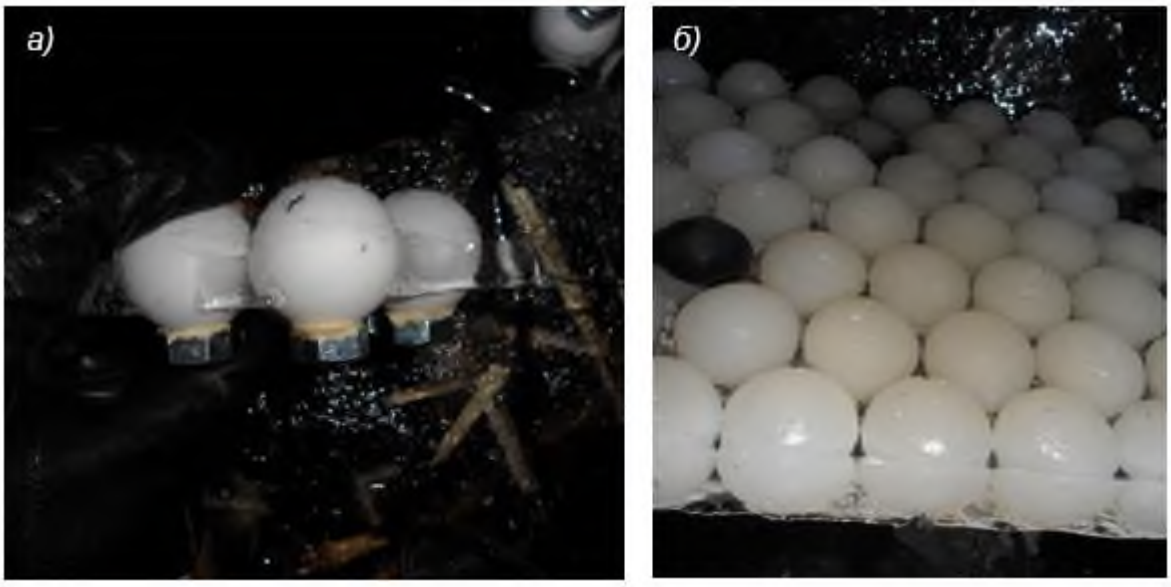


Рисунок 3.3. Применяемые ИВО в полевом эксперименте вмороженые в лед:
а – ИВО½ погружения в воду наполовину; б – ИВО⅔ на 2/3 погружены в воду

Длительность формирования ледового слоя зависела от погодных условий водоема и варьировалась в диапазоне 5–7 ч. В течение суток проводилась серия из двух последовательных полномасштабных экспериментов с клавишами.

Температура воздуха колебалась от –12 С до –17 С, с доминирующими значениями около –15 С. В процессе замораживания пресноводного льда в естественных условиях водоема равномерная фактура образующегося льда обеспечивалась чистотой водной поверхности и ее защитой от ветрового воздействия, отсутствием поступления газа со дна водоема (за счет выбора места и способа вскрытия льда).

При достижении толщины льда на участках полигона в диапазоне 12–15 мм ограничители изымались, и мы получали клавиши, соединенные одним концом с основным полем льда водоема и пригодные для проведения эксперимента.

Испытательный полигон прямоугольной формы (рис. 3.2) был разделен на 3 области, выделенные для проведения эксперимента: область поля льда водоема, область чистой воды (включая очищенное пространство 2 см для обеспечения свободного движения конца клавиши длиной L с толщиной льда $h_л$) и область клавиш с равномерной толщиной льда.

Нагрузка на свободный конец клавиши осуществлялась сверху вниз на поверхность диаметром d = 160 мм постепенным повышением веса, но достаточно быстрым, чтобы избежать текучести льда (рис. 3.4 а).

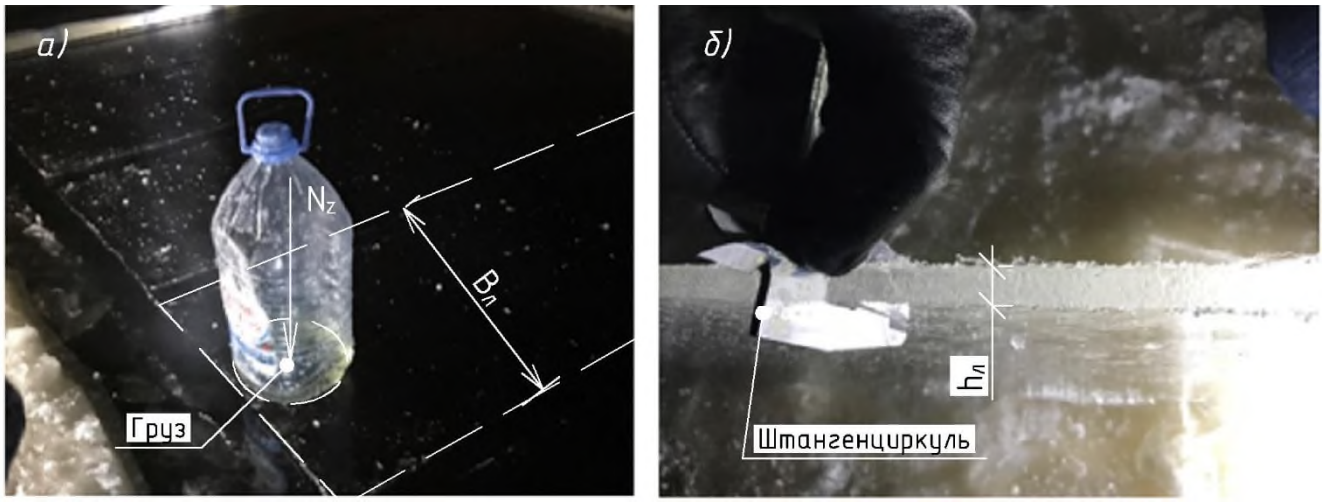


Рисунок 3.4. Проведение полевого эксперимента:

а – прикладывание нагрузки; б – измерение толщины клавиш

Полная схема проведения эксперимента с клавишами из сплошного льда и льда с ИВО приведена на рисунке 3.5.

а) клавиша чистого льда *б) клавиша льда с ИВО*

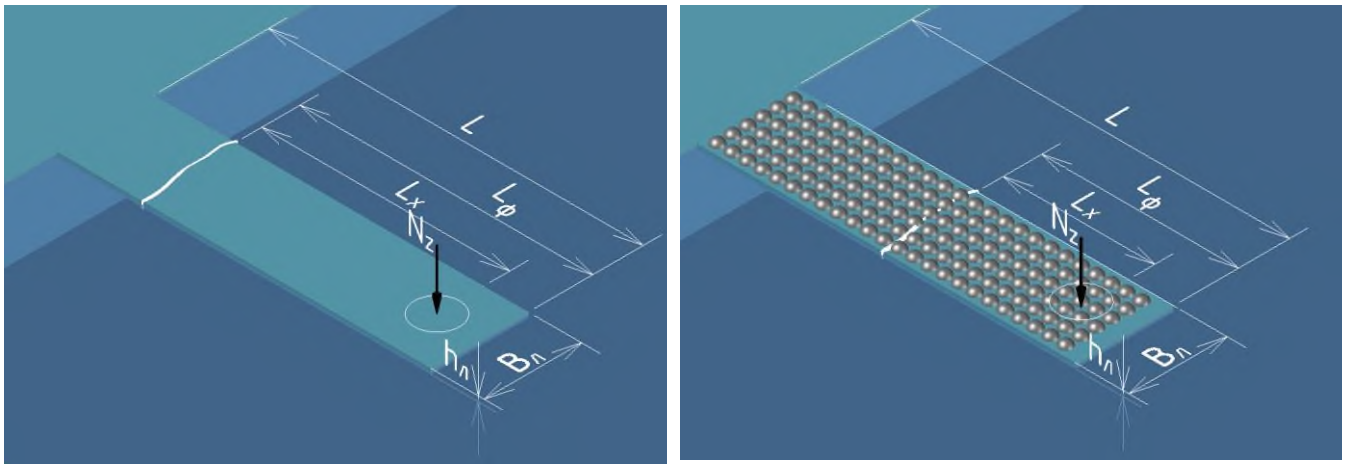


Рисунок 3.5. Схема проведения эксперимента с клавишами из сплошного льда (а) и льда с ИВО (б):

L – полная длина клавиши; L_x – расстояние от линии слома до центра прикладываемой нагрузки; $L_ф$ – длина фрагмента; $B_л$ – ширина клавиши; $h_л$ – толщина клавиши; h_n – погруженная часть клавиши под водой; N_z – прикладываемая вертикальная сила.

Для достижения наиболее точных результатов в материалах Международной ассоциации гидротехнических исследований (МАГИ) [60] рекомендуется соблюдать следующие параметры клавиш: $B_л = (1–2)h_л$, $L = (7–10)h_л$. В нашем случае из-за наличия масштабных шариков эти рекомендации не применимы, однако для проведения сравнительного анализа образцов сплошного льда двух типов и образцов льда с ИВО длина, ширина и толщина образцов были выбраны приблизительно одинаковыми.

Допустимая погрешность проводимых исследований при измерении основных значений включает погрешность измерительных приборов и вызванные природными свойствами льда неровности. Длина, ширина и расстояние до линии слома клавиш измерялись строительной рулеткой, где погрешность не превышает ±10 мм. Толщина клавиш льда и перемещение головы при ломке замерялись

штангенциркулем, погрешность не превышает ±1 мм. Нагрузка измерялась динамометром, погрешность не превышает 0,1 Н.

Поскольку заморозка и испытание клавиш происходили в одном и том же месте при практически одинаковых погодных условиях (слабый ветер и без выпадения снега), свойства материала льда усредняются на основании контрольных клавиш и принимаются одинаковыми для всех образцов (плотность льда 890 кг/м3; модуль упругости 5,4 ГПа).

3.1.3. Результаты обработки экспериментальных данных

Результаты впервые полученных экспериментальных данных (табл. 3.1–3.3) по ИВО интерпретированы в соответствии с общепринятыми методами [56], [57] и принятой для публикаций полнотой представления исходной информации на основании работ [58], а также с учетом принципов их представления в разделах строительной механики, используемых для оценки аварийности. Для определения прочностных характеристик льда для клавиш чистого льда и льда с ИВО½ расчет момента сопротивления W_y выполнялся по зависимости (3.1), а для клавиш с ИВО⅔ – по зависимости (3.3).

Таблица 3.1

Экспериментальные данные для клавиш чистого льда

Длина L, мм	Ширина $B_л$, мм	Толщина $h_л$, мм	Расстояние до линии слома L_x, мм	Сила N_z, Н	Перемещение головы, Δ мм	Прочность льда на изгиб, МПа
1600	330	15	1595	11,00	18	0,87
1720	255	12	1695	7,60	40	1,29
1720	465	15	1670	17,40	26	1,06
1720	465	15	1700	15,53	22	0,885
1720	465	14	1685	14,30	25	0,93
1720	370	15	1695	14,14	27	1,095
1670	500	14	1670	17,45	28	1,096
1720	255	12	1710	7,00	36	1,13

1720	255	12	1695	7,40	39	1,24
1720	255	12	1690	6,10	29	0,89
1720	330	13	1680	9,90	30	1,07
1720	465	12	1690	11,20	29	0,91
1720	465	13	1700	13,80	30	1,05
1720	255	14	1695	8,10	26	0,98
1720	255	15	1695	8,75	23	0,93
1720	330	15	1685	12,57	27	1,09
4000	500	12	2090	13,36	179	1,06
4000	500	12	2115	13,55	189	1,09
4000	500	12	1980	12,82	160	0,97
7000	500	100	5330	457,00	70	0,88
7000	500	100	5965	514,70	89	1,12

Представление экспериментальных данных прямоугольных балок сплошного льда обычно производится в координатах от одного из линейных параметров: ширины или толщины льда. Такой подход становится не совсем корректным при исследовании балок сложного сечения, сформированного ИВО, поэтому для осей применяются интегральные параметры, состоящие из комбинации линейных величин основных измерений, например, площади сечения [56]. В строительной механике в качестве такого интегрального параметра рекомендован момент сопротивления W_y, который и будем использовать в качестве оси абсцисс для интерпретации полученных данных излома сложного сечения балки.

Таблица 3.2

Экспериментальные данные для клавиш льда с ИВО½

Длина L, мм	Ширина $B_л$, мм	Толщина $h_л$, мм	Расстояние до линии слома L_x, мм	Сила N_z, Н	Перемещение головы, Δ мм	Прочность льда на изгиб, МПа
1720	465	12	780	36,20	24	0,95
1720	465	12	825	38,50	35	1,09
1720	465	12	790	36,90	27	0,99
1720	465	13	850	40,00	33	1,01
1720	465	13	910	42,80	40	1,18
1720	255	12	830	20,60	36	1,05
1720	255	12	795	19,80	29	0,96
1720	255	13	900	22,60	41	1,10
1720	255	13	920	23,10	44	1,16
1720	330	12	810	26,50	31	1,03

Таблица 3.3

Экспериментальные данные для клавиш льда с ИВО⅔

Длина L, мм	Ширина $B_л$, мм	Толщина $h_л$, мм	Расстояние до линии слома L_x, мм	Сила N_z, Н	Перемещение головы, Δ мм	Прочность льда на изгиб, МПа
1720	465	13	440	9,40	11	1,12
1720	465	12	405	7,50	10	1,06
1720	465	13	435	8,40	10	1,03
1720	465	12	385	7,20	9	0,97
1720	255	13	390	5,00	10	1,04
1720	255	12	355	4,00	9	0,93
1720	255	13	385	5,00	10	1,01

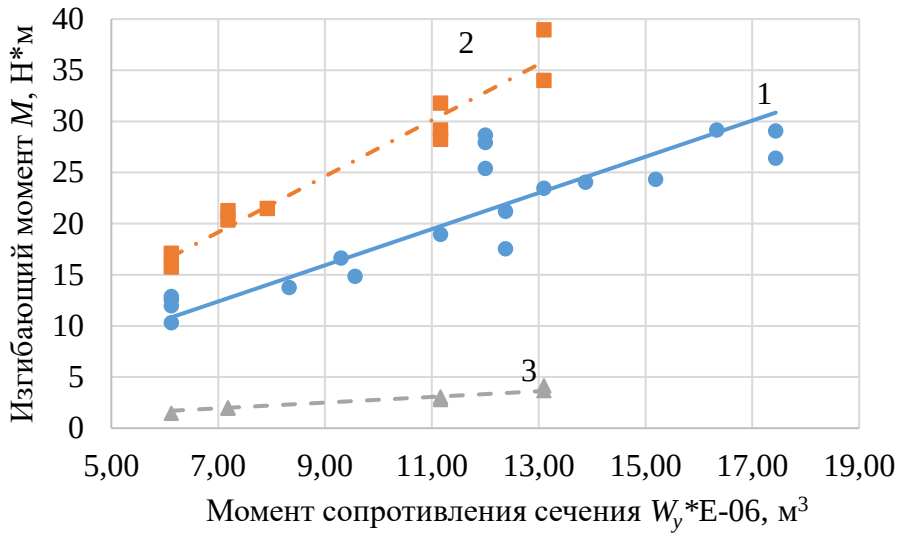
Результаты обработки и сравнения прочностных характеристик клавиш (а не материала льда) из чистого льда и льда с ИВО представлены на рисунке 3.6. По оси абсцисс откладывается момент сопротивления сечения W_y образцов клавиш (из таблиц 3.1–3.3) в месте слома, вычисляемый как для сплошного сечения по зависимости (3.1), где $B_л$, $h_л$ – ширина и толщина образца клавиши. По оси ординат для первого графика откладывается изгибающий момент M_y, создаваемый вертикальной силой N_z, при которой образец ломается в сечении W_y. Для второго графика по оси ординат откладывается вертикальная сила N_z, при

которой образец ломается в сечении W_y. Значения силы N_z определены в результате эксперимента и приведены в табл. 3.1–3.3.

Для проведения оценочных расчетов экспериментальные данные были обработаны методом наименьших квадратов для указанного выше диапазона параметров в виде зависимости:

$$\begin{aligned} M_y &= \left(a \pm \Delta_{1M}\right) y + \left(b \pm \Delta_{2M}\right); \\ N_z &= \left(a \pm \Delta_{1N}\right) y + \left(b \pm \Delta_{2N}\right), \end{aligned} \quad (3.6)$$

а)



б)

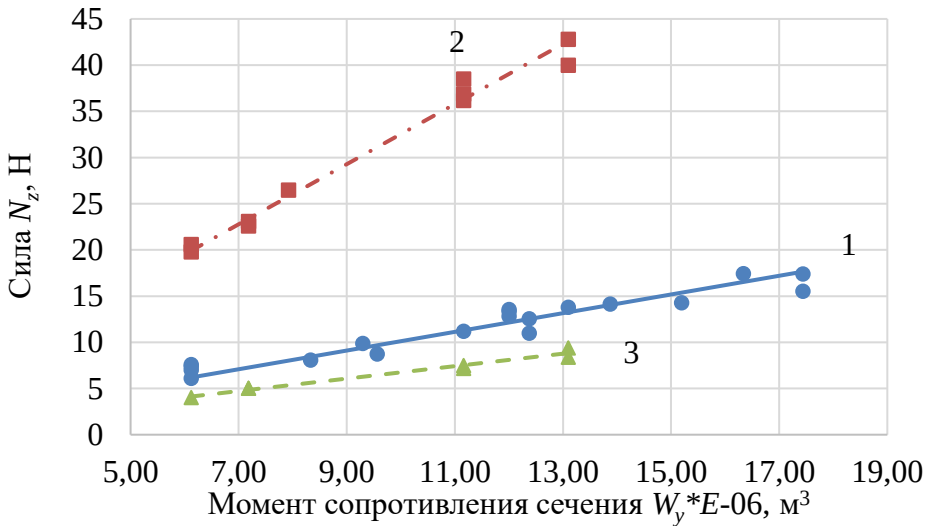


Рисунок 3.6. Графики зависимости изгибающего момента M_y (а) и силы N_z (б) от момента сопротивления сечения W_y: 1 – данные для клавиш чистого льда; 2 – данные для клавиш льда с ИВО½; 3 – данные для клавиш льда с ИВО⅔

где y – обозначает момент сопротивления сечения клавиши W_y в месте слома; a, b – коэффициенты, полученные в результате обработки; $\Delta 1M$, $\Delta 2M$, $\Delta 1N$, $\Delta 2N$ – значения погрешности косвенных измерений для доверительной вероятности 0,95. Для проведения сравнительного анализа получены соотношения для M_y и N_z, которые позволяют оценить влияние ИВО на прочность клавиш льда разной ширины и толщины в зависимости от прикладываемой вертикальной разрушающей силы:

$$M_{y-\text{сл}} = f\left(W_y\right) = (1,77 \pm 0,1)\ y \cdot 10^6 + (0 \pm 1,18)$$
$$M_{y-\text{ИВО½}} = f\left(W_y\right) = (2,74 \pm 0,22)\ y \cdot 10^6 + (0 \pm 2,07)$$
$$M_{y-\text{ИВО⅔}} = f\left(W_y\right) = (0,28 \pm 0,035)\ y \cdot 10^6 + (0 \pm 0,06)$$

$$F_{\text{сл}} = f\left(W_y\right) = (1,01 \pm 0,056)\ y \cdot 10^6 + (0 \pm 0,67)$$
$$F_{\text{ИВО½}} = f\left(W_y\right) = (3,25 \pm 0,15)\ y \cdot 10^6 + (0 \pm 1,49)$$
$$F_{\text{ИВО⅔}} = f\left(W_y\right) = (0,67 \pm 0,051)\ y \cdot 10^6 + (0 \pm 0,09)$$

Полученные экспериментальные данные показали:

перфорация льда с использованием ИВО½ (с коэффициентом адгезии = 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 коэффициентом адгезии → 0) приводила к снижению прочности льда в ≈6,3 раза и уменьшению прикладываемой вертикальной силы в ≈1,5 раза.

В главе 5 рассматривается математическая модель, построенная на основе полученных экспериментальных данных с целью поиска оптимальной конструкции ИВО и получения более эффективных результатов.

3.2. Экспериментальное исследование распределения ИВО после прохождения судов ледового класса

3.2.1. Цели и задачи лабораторного эксперимента

На данном этапе исследования считаем, что будем применять ИВО как свободно плавающие объекты для закрытых акваторий в безливных морях и судоходных речных каналах со шлюзовыми системами. Такие ограничения предполагают значительное снижение влияния внешних факторов, таких как подводные и ветровые течения, сильное волнение, и позволяют минимизировать вынос ИВО за пределы защищаемой ими акватории (без дополнительных инженерных мер). При таких условиях движение судна через поле льда с ИВО является основным условием их выноса за пределы защищаемой зоны. А уменьшение плотности концентрации ИВО приводит к снижению их эффективности.

Для выполнения оценки по изменению плотности концентрации ИВО на защищаемой акватории в ледовом бассейне был проведен сравнительный эксперимент по движению модели корпуса судна ледового класса через поле чистого льда и льда с ИВО. В ходе проведенного эксперимента выполнялась проводка судна через поле льда со свободно плавающими ИВО шарообразной формы. Оценка проводилась с целью проверки предположения, что при прохождении судов через поле льда с ИВО будет происходить существенный вынос ИВО из зоны защищаемого ими гидротехнического сооружения.

Для оценки изменения распределения ИВО в поле льда акватории порта (после прохождения через него судна) была произведена экспериментальная проводка модельного судна через поле модельного льда с масштабированными ИВО, затем с использованием методов математической статистики была произведена оценка значимости полученного изменения распределения масштабированных ИВО по сравнению с их первоначальным распределением в

условиях эксперимента. Проводка производилась двумя ходами судна с модельной скоростью до 2 м/с («вперед» и «назад») через модельный лед, исходя из двух предположений:

1. реальное грузовое судно подходит один раз к грузовому причалу, швартуется к нему и выполняет грузовые операции, в ходе которых канал замерзает, и при этом ИВО вмораживаются (фиксируются от перемещений);

2. судно может произвести одну перешвартовку задним ходом сразу после первой швартовки.

Рассмотрим порядок и результаты проведенных исследований по изменению распределения ИВО, защищающих ГТС, в поле льда после прохождения через него судна.

3.2.2. Проведение лабораторного эксперимента

Экспериментальная установка ледового бассейна ФГБУ «ААНИИ» имеет рабочую зону со следующими габаритными размерами: длина 30 м, ширина 5 м, глубина 6 м. На рисунке 3.7 показана рабочая зона и область выхода модельного судна в ходе проводимого эксперимента.



Рисунок 3.7. Рабочая зона и зона выхода масштабной модели судна

Для испытаний в ледовом бассейне была использована модель судна, изготовленная в масштабе k = 1/65 (формулы перерасчета масштабных значений на натурную величину приведены в табл. 3.5).



Рисунок 3.8. Модель судна и его носовая оконечность (ломающая лед)

Длина модели судна - 1,9 м, ширина - 0,29 м и осадка - 0,13 м. Эксперимент проводился в канале при достижении сплошным моделированным льдом необходимой толщины 15–16 мм и с использованием модельных ИВО диаметром 40 мм. В экспериментальном исследовании на ИВО воздействовали только модельным судном, скорость движения которого задавалась рельсовой тележкой и составляла от 0,001 до 2 м/с.

Таблица 3.4

Формулы перерасчета масштабных (*k*) значений на натурную величину

Параметр	Правило перерасчета
Линейные размеры	$L_н = kL_м$
Толщина	$h_н = kh_м$
Скорость	$\upsilon_н = \sqrt{k}\upsilon_м$
Сила	$P_н = k^3 P_м$
Время	$t_н = \sqrt{k}t_м$

Оценка распределения ИВО шарообразной формы по подходному каналу или акватории после проводки судна выполнена на основании фото- и видеоматериалов. Исследование проводилось с использованием модельных, масштабированных шариков в экспериментальной зоне ледового бассейна длиной 30 м, разделенной на четыре участка, по 5 м каждый (рис. 3.9). При обработке

данных экспериментальная зона графически делилась на ряды шириной 40 мм, в каждом из которых определялось количество ИВО.

По оси абсцисс отложено количество рядов, при этом точки начала и конца распределений шариков определялись по их максимальному разбросу: первый ряд оси абсцисс (рис. 3.10) был выбран по максимальному сносу шариков влево после 1-го прохода судна, представленного на рисунке 3.13, а конечный ряд оси абсцисс был выбран по максимальному сносу шариков вправо – после 2-го прохода (рис. 3.15).

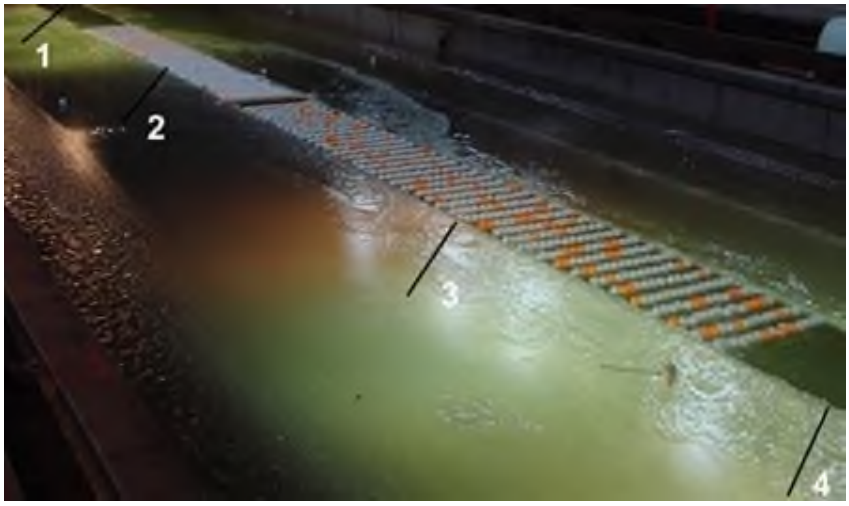


Рисунок 3.9. Рабочая зона и исходное распределение ИВО:

1 – участок моделированного льда; 2 – участок сплошного размещения ИВО; 3 – участок с редко расположенными ИВО; 4 – чистая вода

Первоначальное (исходное) расположение ИВО представлено в виде графиков на рисунке 3.10:

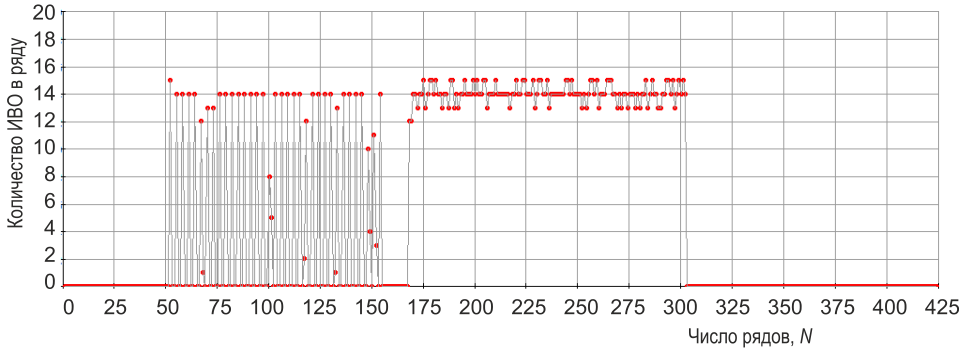


Рисунок 3.10. График исходного распределения ИВО в рабочей зоне

Общее число шариков определялось по формуле:

$$A_j = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n_{макс}}\left[(y_{i-1} + y_i)(x_i - x_{i-1})\right], \quad (3.7)$$

где A_j – суммарная площадь под графиком функции (j = 0 – изначальное положение шариков); 1 – первая проводка судна, 2 – вторая проводка судна); $n_{макс}$ – максимальное число рядов рассматриваемого участка; x_i, y_i – значения по оси абсцисс и ординат рассматриваемого участка.

Общее количество ИВО составило: A_0 = 2386 шт.

Среднее число ИВО в ряду ($\overline{n_j}$) для каждого участка вычислялось как среднее арифметическое на рассматриваемом участке:

$$\overline{n_j} = \frac{\sum y_i}{n_{макс}}, \quad (3.8)$$

На участке 2 в диапазоне 166 ≤ n ≤ 302 (сплошного размещения ИВО) среднее число ИВО в ряду составляет 13,7 шт., а общее количество ИВО, вычисленное по формуле (3.7), составляет A_{0_2} = 1899 шт.

На участке 3 в диапазоне 50 ≤ n ≤ 154 (с редко расположенными ИВО) среднее число ИВО в ряду составляет 4,6 шт., а общее количество ИВО, вычисленное по формуле (3.7), составляет A_{0_3} = 487 шт.

Проводка судна через чистый лед и лед с ИВО приведена на рисунке 3.11:

а *б*



Рисунок 3.11. Движение судна через а) чистый лед и б) лед с ИВО

После первой проводки судна по каналу с неразрушенным льдом на участке 3 (лед, ослабленный редко расположенными шариками) произошло нарушение

расположения шариков, в то время как на участке 2 (участок сплошного размещения шариков) кучность шариков сохранилась (рис. 3.12).

переход от участка 2 к участку 1 переход от участка 3 к участку 2



Рисунок 3.12. Расположение ИВО после первой проводки судна (движение судна справа налево (см. Рисунок 3.9)):

Количество ИВО в рядах (в аналогичных осях, как при исходном расположении ИВО) приведено на рисунке 3.13.

Общее количество ИВО после первой проводки судна, вычисленное по формуле (1), составило: A_1 = 2386 шт. (Потеря составляет 0 шт.)

На участке 2 в диапазоне 166 ≤ n ≤ 302 (сплошного размещения ИВО) среднее число ИВО в ряду, вычисленное по формуле (3.8), составляет 13,1 шт., а общее количество ИВО, вычисленное по формуле (3.7), составляет A_{1_2} = 1804 шт.

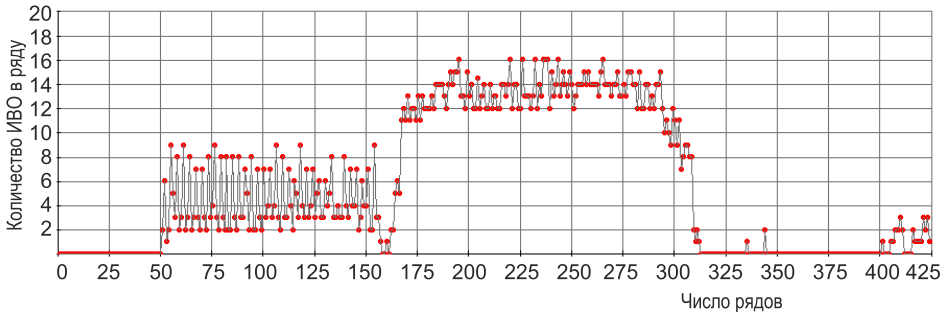


Рисунок 3.13. График расположения ИВО после первой проводки судна

На участке 3 в диапазоне 50 ≤ n ≤ 154 (с редко расположенными ИВО) среднее число ИВО в ряду, вычисленное по формуле (3.8), составляет 4,3 шт., а общее количество ИВО, вычисленное по формуле (3.7), составляет A_{1_3} = 476 шт.

До образования новой ледовой поверхности (чистого льда и льда с ИВО) была выполнена вторая проводка судна (обратным ходом) по каналу с разрушенным ледовым покрытием. На участке 3 (лед, ослабленный редко расположенными шариками) сохранилось нарушенное расположение шариков. На участке 2 (участок сплошного размещения шариков) кучность шариков сохранилась, но произошло вытеснение их по ходу движения судна обратным ходом (рис. 3.14):

переход от участка 1 к участку 2 переход от участка 2 к участку 3



Рисунок 3.14. Расположение ИВО после второй проводки судна (движение судна слева направо (см. Рисунок 3.9))

Количество ИВО в рядах (в аналогичных осях, как при исходном расположении ИВО) приведено на рисунке 3.15.

Общее количество ИВО после второй проводки судна, вычисленное по формуле (1), составило: $A_2 = 2386$ шт. (Потеря составляет 0 шт.)

На участке 2 в диапазоне $166 \leq n \leq 302$ (сплошного размещения ИВО) среднее число ИВО в ряду, вычисленное по формуле (3.8), составляет 12,7 шт., а общее количество ИВО, вычисленное по формуле (3.7), составляет $A_{2_2} = 1742$ шт.

На участке 3 в диапазоне $50 \leq n \leq 154$ (с редко расположенными ИВО) среднее число ИВО в ряду, вычисленное по формуле (3.8), составляет 4,3 шт., а общее количество ИВО, вычисленное по формуле (3.7), составляет $A_{2_3} = 476$ шт.

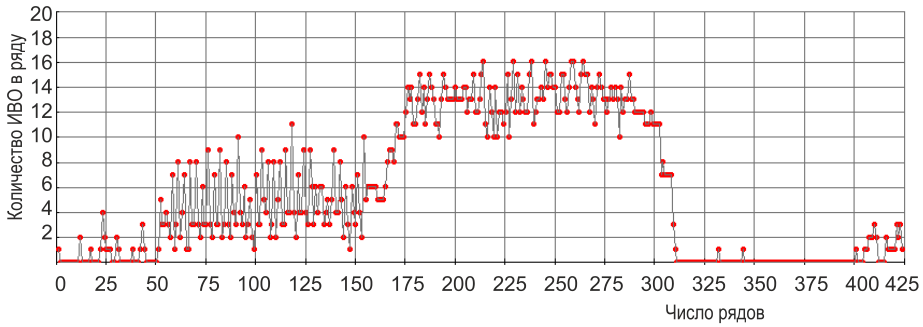


Рисунок 3.15. График расположения ИВО после второй проводки судна

Оценим «расползание» ИВО после первой и второй проводки судна, по сравнению с начальным положением ИВО, через разницу интегралов ΔA путем вычитания площадей по участкам, и в результате обработки данных получим:

для первой проводки судна $\Delta A_{0\text{-}1} = 116$ шт.,

для второй проводки судна $\Delta A_{0\text{-}2} = 168$ шт.

3.2.3. Результаты обработки лабораторных экспериментальных данных

Оценим уровень статистической значимости расхождений между начальным распределением ИВО (y_0) и распределением ИВО после первой (y_1) и второй (y_2) проводки судна с помощью t-критерия Стьюдента [61], [62] как наиболее распространенного критерия для проведения статистического анализа. Расчетный критерий значимости Стьюдента t для двух независимых выборок распределений определяется по формуле:

$$t = \frac{\left| MA_0 - MA_j \right|}{MSE}, \tag{3.9}$$

где MA_j – среднее арифметическое значение столбца данных распределений; MSE – среднеквадратическая ошибка расхождения данных, которые могут быть определены по формуле:

$$MA_j = \frac{\sum y_i}{n_j} \quad \text{и} \quad MSE = \sqrt{\frac{(n_0 - 1) \cdot MSD_0^2 + (n_j - 1) \cdot MSD_j^2}{\gamma} \cdot \left(\frac{1}{n_0} + \frac{1}{n_j} \right)}, \tag{3.10}$$

где MSD_j – среднеквадратическое отклонение; γ – число степеней свободы, которые могут быть определены по формулам:

$$MSD_j = \sqrt{\frac{\sum\left(y_i - MA_j\right)^2}{n_j - 1}}, \tag{3.11}$$

$$\gamma = n_0 + n_j - 2, \tag{3.12}$$

На основании вычисленного критерия Стьюдента t уровень значимости p определяется по таблицам или рассчитывается в вычислительных пакетах по формуле:

$$p = 2\left[1 - pt(|t|, \gamma)\right], \tag{3.13}$$

где $pt(|t|,\upsilon)$ возвращает кумулятивное распределение вероятности для значения t.

Полученные расчетные значения представлены в табл. 3.5:

Таблица 3.5

Результаты обработки по критерию Стьюдента

Наименование вычисляемой статистики	y_0	y_1	y_2
Число элементов n	424	424	424
Среднее арифметическое значение MA	5,627	5,629	5,63
Среднеквадратическое отклонение MSD	6,84	5,77	5,52
Степень свободы υ	846	846	846
Среднеквадратическая ошибка расхождения данных MSE	0	0,435	0,427
Расчетный критерий значимости t	0	0,003	0,006
Расчетный уровень значимости p	1	0,997	0,995

Уровень значимости отклонений двух распределений после проводки судна от исходного распределения наиболее часто определяется в виде значений 0,05; 0,01; 0,001, на основе каждого из которых по степени свободы 846 определяются значения $t_{кр}$ = 1,96; 2,58; 3,30, в соответствии с которыми значение критерия значимости t оказалось много ниже указанных величин $t << t_{кр}$, что

свидетельствует о том, что изменение распределения шариков относительно начального распределения статистически незначительное.

Таким образом, можно сделать вывод, что при движении судна через поле льда с ИВО не происходит существенного выноса и перераспределения ИВО, защищающих ГТС.

Выводы по Главе 3

1. В рамках полевого экспериментального исследования подтверждены теоретические выводы главы 2 о возможности снижения нагрузки на ГТС в результате использования ИВО (2.13-2.15) и получены исходные данные для дальнейшего исследования, включая геометрические параметры ИВО и клавиш льда, модуль упругости, прикладываемая сила, перемещение головы клавиш, расстояние до линии слома.

2. 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 коэффициентом адгезии = 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 коэффициентом адгезии → 0) *приводила к* ***снижению*** *прочности льда* в ≈6,3 раза и ***уменьшению*** *прикладываемой вертикальной силы* в ≈1,5 раза.

3. По результатам лабораторных исследований, проводимых в ААНИИ, при исследовании движения судна через модельный лед с ИВО, были получены и проанализированы статистические данные по изменению расположения шариков после проводки судна. 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%.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ СВОЙСТВ МОДЕЛИРУЕМОГО ЛЬДА

На основе полученных экспериментальных данных в главе 3 была поставлена задача построения математической модели с целью поиска оптимальной конструкции ИВО и решения эксплуатационных задач при их исследовании. Для этого необходимо создать детальную численную имитационную модель и исследовать поведение исследуемых объектов с определением их свойств и границ использования.

В этой главе представлены результаты анализа исследований по свойствам вещества и материалов, используемых в новой технологии, описанные в работах: Богородского В.В., Винникова С.Д., Гаврило В.П., Готлиб Я.Л., Донченко Р.В., Доронин Ю.П., Козлова Д.В., Коржавина К.Н., Песчанского И.С., Пехович А.И., Проскурякова Б.В., Соколова И.Н., Трегуба Г.А., Чижова А.Н., Шаталиной И.Н., Алейников С. М.

Поскольку новая технология ориентирована на снижение передаваемых через ледовый покров нагрузок на гидротехнические сооружения, путем снижения прочности ледового поля за счет перфорации с помощью ИВО, в данной главе исследование в первую очередь направлено на определение: упругих свойств, плотности, пористости льда; температуры воздуха, льда и воды. Определение всех этих параметров, как было отмечено ранее, рассматривается в момент разрушения ледового покрова, когда присутствует максимальная ледовая нагрузка на причальную стенку ГТС.

В результате проведенного анализа открытых источников была определена схема моделирования льда как «композитного материала», состоящего из четырех слоев, для каждого из которых в зависимости от средней температуры слоя рассчитываются параметры льда.

Основные результаты главы изложены в работах автора [11], [47], [63], [64].

4.1. Механические свойства льда

При проектировании гидротехнических сооружений в арктических условиях, для определения ледовых нагрузок в первую очередь руководствуются нормативными документами, такими как НД № 2-020201-019 [65], СП 38.13330 [7], в частности, разделом 7: Ледовые нагрузки на гидротехнические сооружения. При анализе формул можно заметить, что, помимо основных гидрометеорологических данных (ветер, течение, температура воздуха и воды), фигурируют еще параметры: прочность льда на изгиб и сжатие. В нормативном документе предлагаются два варианта по определению прочности льда – на основании опытных данных (что при проектировании причалов и портов редко применяется) или использовать табличные значения (при которых существует высокий риск неточности полученных данных). При этом видно, что прочность льда напрямую зависит от температуры самого льда:

$$\sigma = f(T_л), \tag{4.1}$$

Дополнительно к нормативной литературе, согласно трудам Богородского В.В., Гаврило В.П. [56], Шаталиной И.Н. [3], Пехович А.И. [6] для определения прочности льда формулу (4.1) следует дополнить такими параметрами, как модуль упругости $E_л$, коэффициент Пуассона $\nu_л$, которые тоже являются функцией от температуры $T_л$:

$$\sigma = f(E_л(П, T_л); \nu_л(T_л);), \tag{4.2}$$

Помимо прочности льда, согласно полученной ранее формуле 2.13, необходимо определить силу Архимеда, действующую на лед, которую можно представить как функцию в зависимости от плотности ρ и толщины льда $h_л$:

$$F_a = f(\rho_л(T_л); h_л(z);), \tag{4.3}$$

Таким образом, для создания математической модели необходимо определить основные характеристики льда: плотность, коэффициент Пуассона, модуль упругости и параметры распределения температуры внутри льда. Все эти

характеристики необходимо рассматривать в момент разрушения ледового покрова, когда нагрузка ото льда на причальную стенку ГТС будет максимальна.

Функции, имеющие разрывы при решении нашей задачи, будут приведены к виду, необходимому для использования в работе вычислительных пакетов и тренажерных комплексов [7], [47], [64] Для этого применим метод асимптотических эквивалентных замен [66], согласно которому для функции *f(x)* о в широком диапазоне параметров можно подобрать эквивалентную функцию вида $f1(x, a_1, a_2, \ldots a_n)$, которая будет непрерывна и не будет иметь разрыва первой производной.

4.1.1. Плотность льда

Вопросам изучения плотности льда посвящено большое количество публикаций и работ, из которых в ходе исследования были выделены работы [16], [55], [56], [67], [68] как наиболее значимые для решения задачи диссертационного исследования.

Согласно выделенным работам, морской лед является многокомпонентным, сложным телом, которое состоит в основе своей из пресного льда и кристаллов соли в твердом состоянии и в виде рассола. Тогда в наиболее общем виде масса морского льда ($m_{мл}$) описывается формулой:

$$m_{мл} = m_{пл} + m_{ж} + m_{с},$$

где $m_{пл}$ - масса пресного льда, кг; $m_{ж}$ - масса воды в жидком состоянии, кг; $m_{с}$ - масса солей (в твердом и растворенном состоянии), кг.

Уравнение плотности морского льда в работах Доронина Ю.П. [69] и Назинцева Ю.Л. [68], для практических расчетов записано в виде зависимости плотности морского льда $\rho_{мл}$, кг/м^3 от температуры, давления, пористости, солености льда $s_л$ и рассола:

$$\rho_{мл}(Pa, T_л, П, s_л) = \frac{\rho_{пл}(Pa, T_л, П)}{m_р(T_л, s_л) \cdot V_р + 1} \cdot 10^3, \qquad (4.4)$$

где

$$V_p = \left[\frac{\rho_{пл}(Pa, T_л, П)}{1 + 0,0008 \cdot s_p(T_л)} - 1 \right], \quad (4.5)$$

где $m_p(T_л, s_л)$ - масса рассола в 1 кг морского льда как функция от температуры льда; V_p – объем рассола; $s_p(T_л)$ - соленость рассола, функция от температуры льда; $\rho_{пл}(Pa, T_л, П)$ - плотность чистого льда в зависимости от температуры льда, давления, пористости. Рассмотрим эти ключевые значения последовательно и выразим их функции.

Масса рассола $m_p(T_л)$ как функция от температуры льда получена на основании расчетных данных Назинцева Ю.Л. [68] для солености льда $s_л$ 10‰:

$$m_p(T_л, s_л) = f(f1, f2) \cdot \frac{s_л}{10}, \quad (4.6)$$

$f1, f2$ – функции, полученные автором методом асимптотических эквивалентных замен экспоненциальными функциями, $\frac{s_л}{10}$ - множитель для солености льда отличной от 10‰.

Будем считать, что эвтектическая точка происходит при температуре 22.9°C, тогда запишем формулы для массы рассола:

$$\begin{cases} m_p(T_л, s) = \left(f1(T_л) \cdot f(T_л + 22.9) + f1(T_л) \cdot f(-T_л - 22.9) \right) \cdot \frac{s_л}{10} \\ f1(T_л) = 1.104 \cdot e^{1.166 \cdot T_л} + 0.205 \cdot e^{0.193 \cdot T_л} + 0.037; при - 1°C \geq T_л \geq -22.9°C \\ f2(T_л) = 0.019 \cdot e^{0.021 \cdot T_л} + 10^3 \cdot e^{0.47 \cdot T_л}; при - 22.9°C \geq T_л \geq -30° \\ f(x) = \frac{0.5 \cdot x}{|x| + 1} + 0.5 \end{cases}$$

Зависимость функции $m_p(T_л, s_л)$ от температуры льда $T_л$ °C (от минус -50°C до 0°C) и солености льда $s_л$ = 10‰ представлена в виде графика на рисунке 4.1:

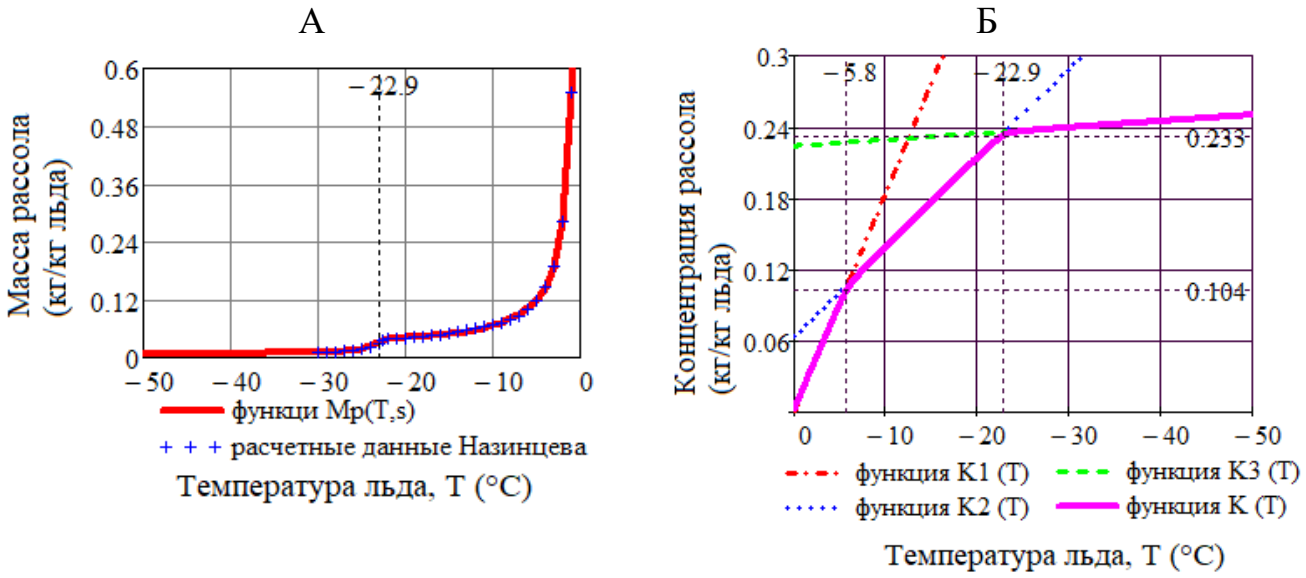


Рисунок 4.1. График зависимости массы рассола m_p (А) и концентрации рассола K (Б) от температуры $T_л$ льда

На графике произведено сравнение экспериментальных данных (обозначено «+++») работы Назинцева Ю.Л. [68] со сплошной линией, описанной функцией, предложенной автором по методу асимптотических эквивалентных замен, где наблюдается совпадение результатов.

Соленость рассола $s_p(T_л)$ как функция от температуры льда получена на основании экспериментальных данных Швердтфегера [70], Гиттермана, Нельсона, Томпсона, Рингера [71], приведенных в трудах [69], с помощью функции К(Т) для определения концентрации рассола от температуры. Таким образом, автором предложена зависимость солености рассола $s_p(T_л)$ от концентрации К(Т), определяющаяся по формуле:

$$s_p(T_л) = \frac{K(T_л)}{K(T_л)+1}, \qquad (4.7)$$

где $K(T_л) = f(K1, K2, K3)$ определяется системой уравнений, полученной автором методом асимптотических эквивалентных замен:

$$\begin{cases} K(T_л) = K'(T_л) \cdot f(T_л + 23) + K3(T_л) \cdot f(-T_л - 22.9) - 0.0035 \\ K'(T_л) = K1(T_л) \cdot f(T_л + 7.6) + K2(T_л) \cdot f(-T_л - 7.6) - 0.0035 \\ K1(T_л) = -0.01848 \cdot T_л; при\ 0°C \geq T_л \geq -7.6°C \\ K2(T_л) = 6.240 - 1.031 \cdot T_л; при -7.6°C \geq T_л \geq -22.9°C \\ K3(T_л) = 0.224 - 0.00052 \cdot T_л; при -22.9°C \geq T_л \geq -50°C \\ f(x) = \dfrac{0.5 \cdot x}{|x| + 0.001} + 0.5 \end{cases}$$

Зависимость функции $K(T_л)$ от температуры льда $T_л\ °C$ (от -50°С до 0°С) представлена в виде графика на рисунке 1(Б).

Плотность пресного льда $\rho_{пл}$ как один из частных случаев морского льда, по разным источникам, описывается формулами:

- наиболее распространённая: с понижением температуры плотность чистого льда увеличивается вследствие сжатия:

$$\rho_{пл}(T_л) = \frac{\rho_{0л}}{1 + \gamma \cdot T_л}$$

- Козлов Д. В. [16] предложил функцию плотности пресного льда в зависимости от температуры и пористости:

$$\rho_{пл}(T_л, П) = \rho_{0л} \cdot (1 - \gamma \cdot T_л) \cdot (1 - П)$$

- Паундер Э. [77] предложил учитывать температуру и давление:

$$\rho_{пл}(Pa, T_л) = \rho_{0л} \cdot (1 - \gamma \cdot T_л) \cdot (1 + 0.94 \cdot 10^{-7} \cdot (Pa - 1)).$$

С учетом выше приведенных зависимостей для чистого пресного льда будем использовать составленную нами функцию плотности пресного льда в зависимости от давления, температуры и пористости:

$$\rho_{пл}(Pa, T_л, П) = \frac{\rho_{0л}}{1 + \gamma \cdot T_л} \cdot (1 + 0{,}94 \cdot 10^{-7} \cdot (Pa - 1)) \cdot (П - 1), \qquad (4.8)$$

где γ – коэффициент объемного расширения льда (0,158·10-3 °С -1), Pa – давление в атм, $\rho_{0л}$ - плотность чистого пресноводного льда, без пор, при температуре 0°С и атмосферном давлении 1 атм и составляет 916.8 кг/м^3, n - пористость м^3/кг.

В соответствии с уравнением (4.4) и вышеперечисленными зависимостями (4.5-4.8) построим график (в аналогичных осях как представлено в [20]) плотности морского льда $\rho_{мл}$ (кг/м^3) как функцию от температуры $T_л$ (°С) при его разной солености s (‰).

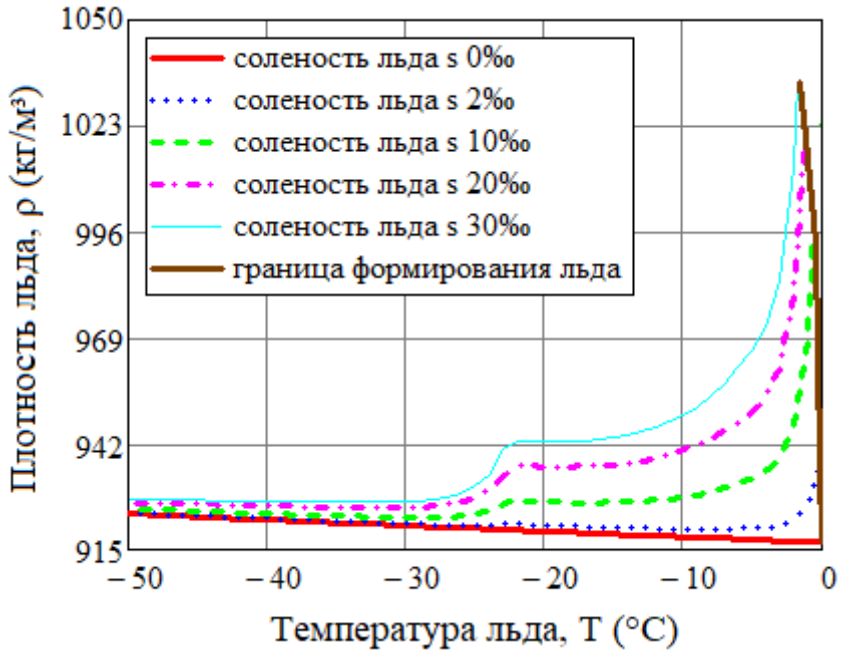


Рисунок 4.2. График зависимости плотности льда (различной солености s) от его температуры $T_л$,

Анализ графика показал, что зависимости (4.4-4.8) не имеют разрыва и являются непрерывными, что в, свою очередь, дает возможность использовать их в вычислительных пакетах и тренажерных комплексах, реализующих расчет $\rho_л = f(Pa, T_л, П, s_л)$. Полученные числовые и графические результаты достаточно точно совпадают с экспериментальными и теоретическими данными, полученными другими авторами.

4.1.2. Пористость льда

Пористость льда, как и у любого другого материала, оказывает влияние на его физико-механические (плотность, прочность, упругость) и тепловые свойства (проводимость). В идеальной среде появление пор во льду связано с его процессом замерзания, при котором лед расширяется. Для морского льда, помимо стандартных термических процессов, появление пор еще сопровождается появлением микропор с рассолом по всему сечению льда, который в дальнейшем может замещаться воздухом.

На практике, вне лабораторий (или искусственно созданных условий) идеальная среда не встречается. Поры во льду могут быть дополнительно созданы как самими условиями среды, где он намерзает (наличие примесей в воде), так и внешними факторами (выделение газов со дна). Пористость льда может характеризоваться удельным объемом, который лежит в абсолютно разных диапазонах, влияя на внешний вид льда: от прозрачного (1-50 $см^3$/кг) до мутного (10-100 $см^3$/кг) и даже снегообразного (50-400 $см^3$/кг) вида.

Связь пористости льда с плотностью описывается формулой:

$$П = \frac{\rho_{0л} - \rho_л}{\rho_л},$$

где $\rho_л$ - плотность (фактическая) льда.

Такой способ определения пористости позволяет оценить наличие пор, созданных механическим или термическим способом, и во многом позволяет решить большую часть задач.

В работе Богородского П.В. и Пнюшков А.В. [67], была предложена простая модель кристаллизации морской воды, в результате которой, в естественных условиях формирования ледяного покрова, можно оценить пористость льда с учетом пор, заполненных незамерзшим раствором.

$$П_р = \frac{T_0 \cdot h_m}{(T_0 - T_4) \cdot z + T_4 \cdot h_m}$$

Поры, заполненные незамерзшим раствором, визуально сложно определимы, особенно в полевых условиях, и не сказываются на плавучести самого льда. Однако их наличие может оказать сильное влияние на прочностные характеристики льда.

Для получения более точных результатов автор принял в расчетах подход, при котором пористость вычисляется в результате использования двух моделей:

$$П_л = П_р + П \cdot k(z), \tag{4.9}$$

На рисунке 4.3 показаны результаты расчета (применимые для конкретного льда) для плотности льда 890 кг/м^3 на основании полученных экспериментальных данных, представленных в главе 3.

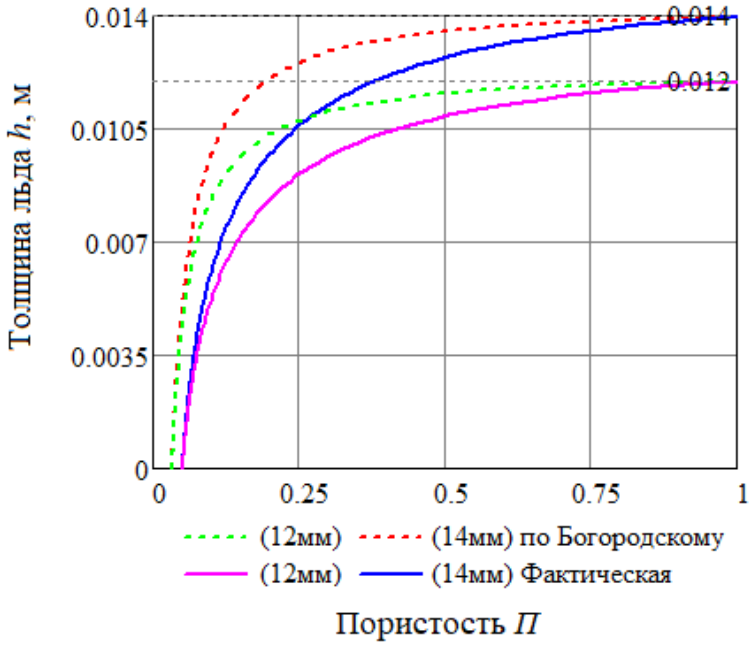


Рисунок 4.3. График пористости льда по толщине

4.1.3. Коэффициент Пуассона

Коэффициент Пуассона, как и модуль упругости, является одной из констант упругости для описания поведения материала. На основании изученных источников [16], [55], [56], [69] можно считать, что значение коэффициента Пуассона достаточно стабильно и лежит в пределах $\nu_л$ =0,30-0,40, но также были зафиксированы случаи превышения этого диапазона.

К сожалению, изучению коэффициента Пуассона посвящено мало источников. Для его определения зачастую используют стандартные формулы, как например:

ультразвуковым методом: $\nu = \frac{c_l^2 - 2 \cdot c_t^2}{2 \cdot \left(c_l^2 - c_t^2 \right)}$

или через модуль сдвига G_d, полученный опытным путем $\nu = \frac{E}{2 \cdot G_d} - 1.$

Считается, что коэффициент Пуассона не значительно зависит от температуры. В то же время для морского льда В.Уикса и А.Асура [72] предложили экспоненциальную зависимость коэффициента Пуассона ν от температуры льда T°C (данные и зависимость изложена в работе [55]):

$$\nu(T_л) = 0.333 + 0.06105 \cdot e^{(T_л/5.48)}$$

В рамках нашего исследования коэффициент Пуассона был принят на основании справочных данных и литературных исследований как равный 0,35.

4.1.4. Модуль упругости

Модуль упругости *E* - одна из основных характеристик, описывающих поведение льда как материала, при создании математической модели. Наряду с плотностью, модуль упругости зависит от пористости, температуры, солености (и времени). Анализ литературы [55], [56], [69] показал, что модуль упругости может варьироваться в широком диапазоне в зависимости от условий и сред, где формируется ледовое поле.

Одним из наиболее точных способов определения модуля упругости является натурное исследование импульсным ультразвуковым или резонансным методом. Но также, наряду с натурными исследованиями, были проведены многочисленные опытные эксперименты, в результате которых многими авторами получены эмпирические зависимости. Например, для пресного чистого

льда модуль упругости $E_{пл}$ (Па) как функцию от температуры T°С В. П. Берденников [73] предлагает определять по формуле:

$$E_{пл}\left(T_л\right)=\left(87.6-0.21\cdot T_л-0.0017\cdot T_л^{\,2}\right)\cdot 10^8, \tag{4.10}$$

а К. Хуттер [74] предложил следующую линейную зависимость:

$$E_{пл}\left(T_л\right)=9.21\cdot\left(1-0.00146\cdot T_л\right)\cdot 10^9, \tag{4.11}$$

Графики функций $E_{пл}$ в зависимости от температуры $T_л°C$ представлены на рисунке А:

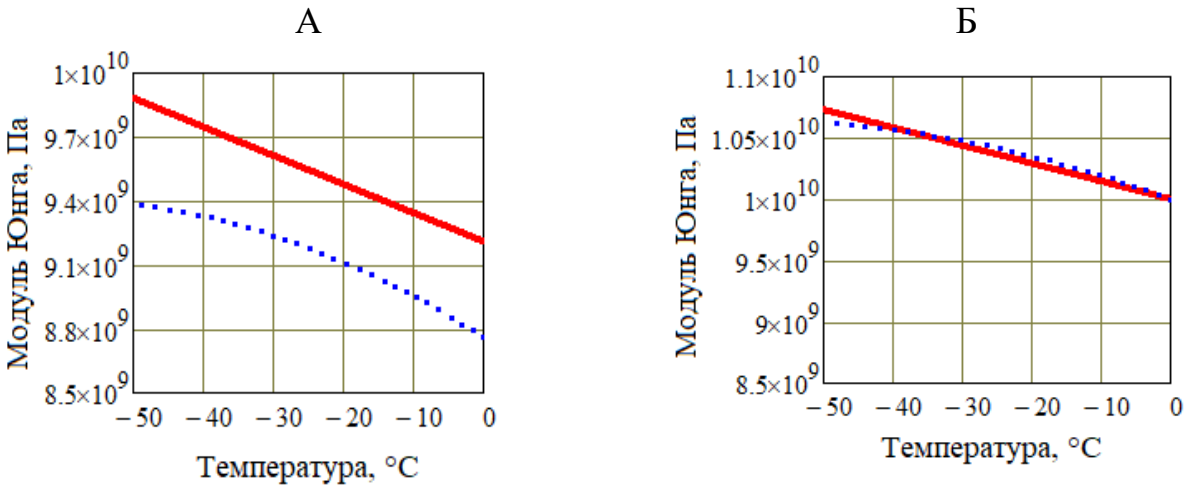


Рисунок 4.4. График зависимости модуля упругости чистого (А) и пористого (Б при $П_л$ = 0.03) пресного льда от его температуры Т°С

прерывистая линия – зависимость по В.П. Берденникову;

сплошная линия – зависимость по К. Хуттеру

Если проанализировать формулы (4.10) и (4.11), а также, основываясь на выводах Богородского В.В. [56] и Доронина Ю.П. [69], можно сказать, что значения 8,76 ГПа и 9,21 Гпа - не что иное, как начальный модуль упругости чистого льда. Но поскольку лед сложное тело, с различной структурой и пористостью, значения отличаются, а формулы носят частный характер.

Зависимость модуля упругости от пористости для структуры с перекрывающимися сферическими порами (ПСП) описывается зависимостью [78]:

$$E_{пл}=E_{0л}\cdot\left(1-П_л\right)^2, \tag{4.12}$$

Если подставим формулу (4.12) в формулы (4.10) и (4.11), то получим следующие зависимости $E_{пл}\left(T_л, П_л\right)$, Па:

$$E_{пл}\left(T_л, П_л\right) = \left(E_{0л} \cdot \left(1 - П_л\right)^2 - 0.21 \cdot T_л - 0.0017 \cdot T_л^{\,2}\right) \cdot 10^8$$

$$E_{пл}\left(T_л, П_л\right) = E_{0л} \cdot \left(1 - П_л\right)^2 \cdot \left(1 - 0.00146 \cdot T_л\right) \cdot 10^9, \qquad (4.13)$$

Предположим, что изначальный модуль упругости для чистого сплошного льда равен $E_{0л}$ = 10 ГПа, тогда функции на графике будут иметь значения (см. рис. 4.5) при пористости $П_л$ = 0.03: на рисунке 4.4 (Б) видно, что функции стали максимально близки и находятся в 95% доверительном интервале. Для удобства и простоты записи в дальнейших расчетах $E_{пл}$ будет использована формула (4.13).

В случае определения модуля упругости $E_{мл}$ (Па) морского льда авторами предлагаются следующие зависимости:

В. П. Берденников: $E_{мл}\left(T_л, П_л\right) = E_{пл}\left(T_л, П_л\right) \cdot \left(1 - 3 \cdot \dfrac{s_л}{s_p\left(T_л\right)}\right)$

Л. Голда [75]: $E_{мл}\left(T_л, П_л\right) = E_{пл}\left(T_л, П_л\right) \cdot \left(1 - \sqrt{V_p\left(T_л, s_л\right)}\right)^4$

К.Хуттер предложил определять модуль упругости по следующей системе:

$$E_л\left(T_л, П_л, s_л\right) = \begin{cases} E_{пл}\left(T_л, П_л\right) \cdot \left(1 - 5 \cdot V_p\left(T_л, s_л\right)\right), \textit{ при } 0 \le V_p\left(T_л, s_л\right) \le 0.15 \\ E_{пл}\left(T_л, П_л\right) \cdot \left(\begin{array}{l} 47.168 \cdot \left(0.15 - V_p\left(T_л, s_л\right)\right)^3 - \\ -45.97 \cdot \left(0.15 - V_p\left(T_л, s_л\right)\right)^2 + \\ +0.5 \cdot \left(0.15 - V_p\left(T_л, s_л\right)\right) + 0.25 \end{array}\right), \textit{ при } 0.15 \le V_p\left(T_л, s_л\right) \le 0.4 \\ 0.06 \cdot E_{пл}\left(T_л, П_л\right) \cdot \left(1 - V_p\left(T_л, s_л\right)\right), \textit{ при } 0.4 \le V_p\left(T_л, s_л\right) \le 1 \end{cases}$$

(4.14)

где $V_p\left(T_л, s_л\right)$ – объем рассола, $s_p\left(T_л\right)$ соленость рассола, $s_л$ - соленость льда.

Также стоит отметить, что в своей работе Козлов Д.В. [16] говорит от том, что модуль упругости - величина переменная, и вместо нее для расчетов применяют модуль деформации E_d, (т/м^2), учитывающий τ – время действия нагрузки, который предлагается определять по формуле К.И. Россинского [76]:

$$E_d\left(T_л,\tau\right)=61400\cdot\frac{\left(1-T_л\right)^{0.6}}{\left(0.011\cdot\tau^2+\tau\right)^{0.5}}$$

Но поскольку в рамках нашего исследования поставленные в работе задачи рассматриваются при кратковременном приложении полного цикла нагрузки до момента разрушения ледового покрова, такой параметр, как время действия нагрузки, опускается.

График зависимостей модуля упругости от температуры $T_л$ °С для солености льда 10‰ и при пористости $П$ = 0.03 представлен на рисунке 4.5.

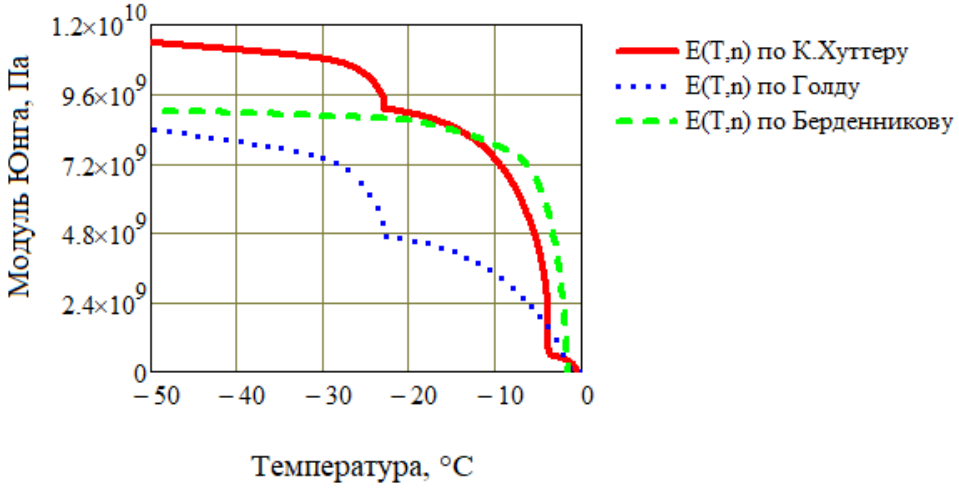


Рисунок 4.5. График зависимости модуля упругости морского льда от температуры T°C

На основании изученных источников и с учетом рассматриваемой задачи (нагрузка является кратковременной и разрушающей) зависимости (4.14), предложенные К. Хуттером, будем в дальнейшем использовать для описания характеристик льда в нашем исследовании.

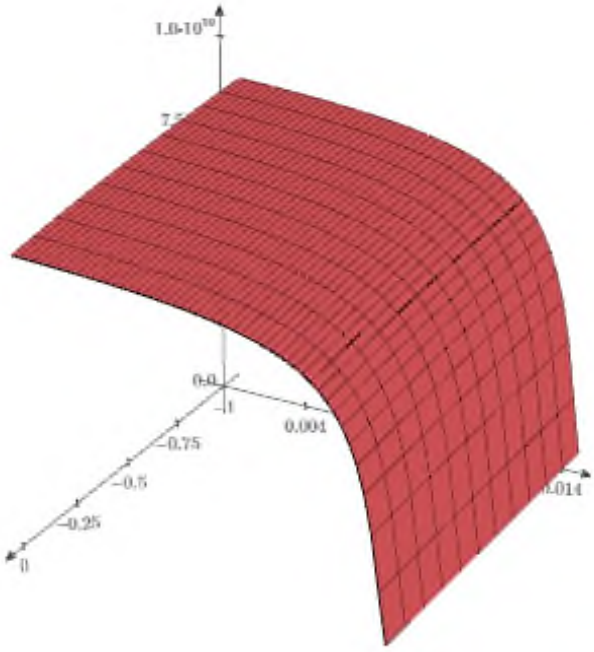


Рисунок 4.6. График зависимости модуля упругости от пористости и температуры по толщине льда

На рисунке 4.6 представлены расчетные значения по зависимости (4.14), с учетом пористости (4.9), в соответствии с полученными экспериментальными данными, для толщины льда 14 мм.

4.2. Модель льда и определение температуры

Температура льда является одним из наиболее важных параметров в определении характеристик льда. Это подтверждается не только описанными ранее зависимостями, но и в работах многих авторов [3], [16], [55], [56], [79], [81].

В естественной среде температура льда неоднородна по всей ее толщине и будет изменяться согласно законам стационарного теплообмена, с учетом теплофизических свойств исследуемого образца (рис. 4.7).

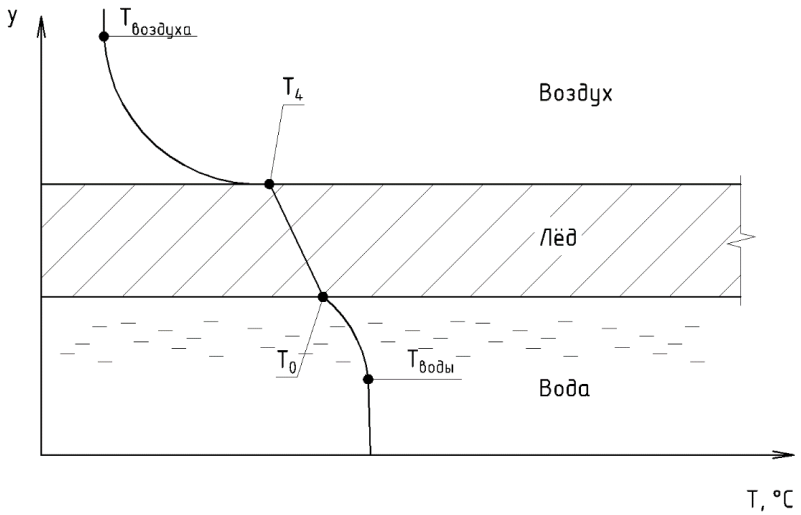


Рисунок 4.7. Схема теплопередачи между воздухом и водой через лед

$T_{воздуха}$ – температура воздуха; T_4 –температура на границе лед-воздух; T_0 –температура на границе лед-вода; $T_{воды}$ –температура воды

В такой системе изменение температуры ледового покрова от $T_0 \sim 0°C$ до T_4 → температуры воздуха, оказывает влияние на числовые значения, полученные по формулам (4.8; 4.9; 4.13). Усреднение температуры льда по всему сечению может привести к ошибкам и неточностям ввиду нелинейности многих зависимостей.

Для минимизации недостоверности полученных данных следует разбивать толщу ледового покрова на слои. В СП38.13330 п. 7 [7] (Нагрузки и воздействия) указывается, что число слоев должно быть не менее трех. Автором было принято решение, что в рамках исследования с учетом полученных ранее экспериментальных данных будет использоваться четырехслойная модель льда (рис. 4.8).

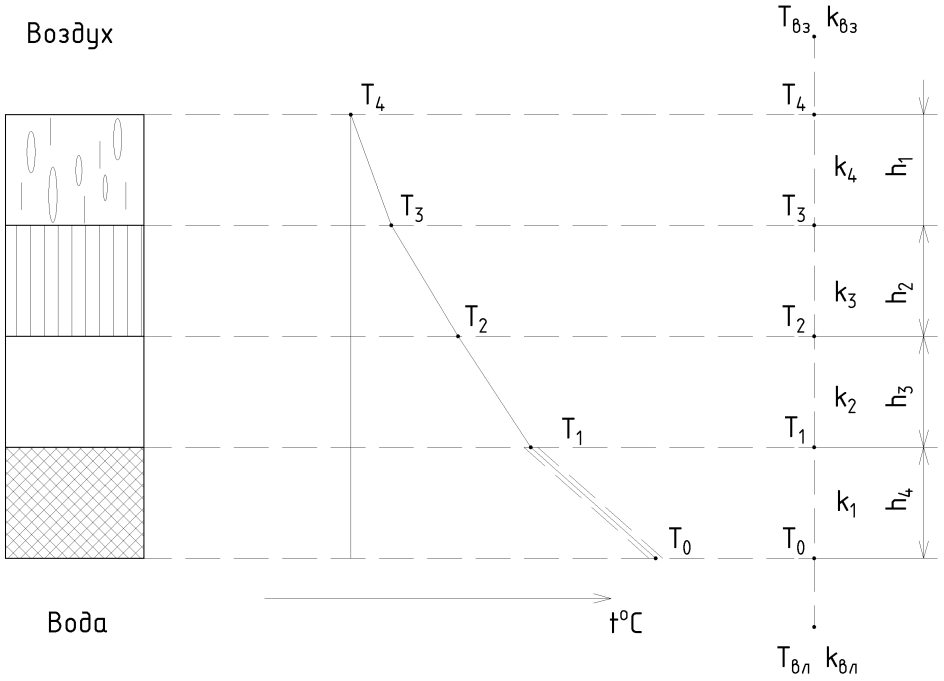


Рисунок 4.8. Композитный 4х-слойный материал

Для каждого слоя будут задаваться свои значения и характеристики согласно средней температуре слоя.

$$\begin{cases} h_4 \to T_{ср4} \;\to\; E_4, \nu_4 = f(T_{ср4}, П_4) = \sigma_{изг4} \\ h_3 \to T_{ср3} \;\to\; E_3, \nu_3 = f(T_{ср3}, П_3) = \sigma_{изг3} \\ h_2 \to T_{ср2} \;\to\; E_2, \nu_2 = f(T_{ср2}, П_2) = \sigma_{изг2} \\ h_1 \to T_{ср1} \;\to\; E_1, \nu_1 = f(T_{ср1}, П_1) = \sigma_{изг1} \end{cases}$$

В результате для каждого из слоев будут рассчитаны и получены свои значения напряжения (прочностные характеристики), которые будут в дальнейшем сравниваться.

Для определения средней температуры слоев льда воспользуемся известной теорией теплопередачи от одной среды к другой [3], согласно которой в стационарной постановке (рис. 4.8) суммарное количество теплоты через площадь *A*, переданное от воздуха к воде через термическое сопротивление *Qr(Тл,Пл) (*в правой части формулы (4.15)), равно количеству теплоты *Q*, переданному между слоями площадью *A* и сопротивлением соответствующих слоев (левой части формулы (4.15)):

$$\left.\begin{array}{l} Q=\alpha_{вл}\cdot\ (T_0-T_{вл})\cdot A \\ Q=\lambda_1/h_1\cdot(T_1-T_0)\cdot A;\ Q=\lambda_2/h_2\cdot(T_2-T_1)\cdot A \\ Q=\lambda_3/h_3\cdot(T_3-T_2)\cdot A;\ Q=\lambda_4/h_4\cdot(T_4-T_3)\cdot A \\ Q=\alpha_{вз}\cdot\ (T_{вз}-T_4)\cdot A \end{array}\right\}\rightarrow ,$$

$$\rightarrow\begin{cases} Q=\dfrac{1}{Qr(T_л,П_л)}\cdot\ (T_{вз}-T_{вл})\cdot A \\ Qr(T_л,П_л)=\dfrac{1}{\alpha_{вл}}+\sum\limits_1^n\dfrac{h_n}{\lambda_n(T_n,П_n)}+\dfrac{1}{\alpha_{вз}} \end{cases} \qquad (4.15)$$

Откуда, зная толщины слоев (или предполагая их равными) и их теплопроводность, коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{вз}$ и $\alpha_{вл}$, а также температуру воздуха и воды, можно найти температуры границ слоев T_0, T_1, T_2,T_3,T_4 :

$$T_n=T_{вл}-\left(\frac{T_{вл}-T_{вз}}{Qr(T_n,П_n)}\right)\cdot\left(\frac{1}{\alpha_{вл}}+\sum_0^n\frac{h_n}{\lambda_n(T_n,П_n)}\right)\rightarrow T_{ср\ n}=0{,}5\cdot(T_n-T_{n-1}),$$

где $\alpha_{вл},\alpha_{вз}$ – коэффициенты теплоотдачи между системами вода-лед и лед-воздух, Вт/(м^2*°С); $T_{вл},T_{вз}$ – температура воды и воздуха, °С; $\lambda_n(T_n,П_n)$– теплопроводность материала в зависимости от температуры и пористости, Вт/(м*°С); h_n – толщина слоев льда, м; n – количество слоев (считая, что при n = 0, h_n=0).

Коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{вл},\alpha_{вз}$ для бесконечно длинной пластины определяются как функция от критерия Нуссельта (Nu) и в зависимости от способа теплопередачи: при свободной конвекции Nu_S (без внешнего движения среды: без ветра или течения) и при вынужденной конвекции Nu_V (если есть ветер или течение):

$$\alpha=f\left(Nu\right)\rightarrow\begin{cases} Nu_S=a_1\cdot\mathrm{Re}^b\cdot\mathrm{Pr}^{c_1} \\ Nu_V=a_2\cdot Ra^{b_2}\cdot\mathrm{Pr}^{c_2} \end{cases}$$

которые зависят от критериев Прандтля (Pr), Рейнольда (Re), Рэлея (Ra) [80] с соответствующими коэффициентами a, b, c. На основе обзора литературных данных, для расчета $\alpha_{вл},\alpha_{вз}$ воспользуемся упрощенными зависимостями при

вынужденной конвекции, в зависимости только от температуры и скорости потока, а также, для оценочных расчетов, данными работы [3]:

$$\begin{cases} \alpha_{вз} = \dfrac{C_{вз} \cdot \rho_{вз} \cdot A_{2\,вз}}{\mathrm{Pr}_{вз}} \cdot \left(\sqrt[3]{\dfrac{\pi \cdot A_{2\,вз}{}^{2}}{4 \cdot \mathrm{Pr}_{вз}}} \right) \cdot \upsilon_{вз} \\ \alpha_{вл} = \dfrac{C_{в} \cdot \rho_{в} \cdot A_{2\,в}}{\mathrm{Pr}_{в}^{\,0.73}} \cdot \upsilon_{в} \end{cases}$$

где C – удельная теплоемкость (в зависимости от температуры), Дж/(кг°С); υ – скорость потока, м/с.

После получения температурного профиля внутри льда температура усредняется по слоям и, с учетом рассмотренных ранее свойств веществ, задается послойно в расчетном пакете в качестве начальных условий для моделирования разрушения льда.

Выводы по Главе 4

1. Исследованы свойства вещества и материалов, используемых в предложенной автором технологии.

2. Сформулирован подход, в котором расчет деформационных воздействий на лед рассматривается при кратковременном приложении нагрузки до момента разрушения ледового покрова.

3. Определены аналитические зависимости плотности, модуля упругости, пористости в зависимости от температуры и солености, для создания математической модели, при разработке которых применен метод эквивалентной замены с целью обеспечения непрерывности функции и ее первой производной, и возможности их использования в расчетных пакетах и тренажерах.

4. Предложена четырехслойная модель льда, в которой в зависимости от средней температуры слоя рассчитываются собственные характеристики льда.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРЕДЛАГАЕМОЙ ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ЛЕДОВОГО ПОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННО ВМОРОЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Данные, полученные в результате проведенного полевого эксперимента и представленные в главе 3, позволили подтвердить теоретические выводы, сделанные в главе 2: о влиянии материала и свойств ИВО на прочностные характеристики льда и передаваемые усилия через лед на ГТС. Но этих данных недостаточно для определения наиболее эффективных технических решений предлагаемой автором технологии. С целью оценки влияния материала и технических параметров ИВО на ледовое поле, автором проведена разработка численной модели и выполнено сравнение результатов расчета с полученными ранее экспериментальными данными.

Расчетные исследования проводились в программном комплексе Abaqus FEA с использованием метода конечных элементов. При создании численной модели по изгибу пластины льда, покоящейся на воде, была применена модель Винклера - длинная пластина на упругом основании, защемленная одним концом, и применены характеристики 4х-слойной модели льда, полученные на основе результатов исследований главы 4.

На основе разработанной в данной главе численной модели были выполнены многовариантные расчеты с варьированием параметров ИВО с целью поиска оптимальных геометрических величин. С использованием полученных данных был выполнен сравнительный анализ по снижению горизонтальных и вертикальных усилий, создаваемых в ледовом поле. В ходе исследований автором установлены оптимальные характеристики ИВО предлагаемой технологии и зоны ее применения.

Основные результаты главы изложены в работах автора [63].

5.1. Описание расчетной модели в программном комплексе Abaqus FEA

На базе проведенного эксперимента и представленных в главе 4 данных была построена пространственная двумерная численная модель в расчётном комплексе Abaqus FEA. В проводимом численном эксперименте использовались четыре основных вещества: полиуретановые ИВО, вода, лед и воздух (как среда с постоянной температурой и задаваемой теплопроводностью). При построении модели были приняты следующие допущения:

1. ИВО предлагается рассматривать как абсолютно твердое тело, через которое будет передаваться усилие.

2. Вода рассматривается как несжимаемая среда с плотностью, зависящей только от солености и температуры.

3. Лед считается упругой средой [82], [83] и моделируется как композитный материал, состоящий из четырех слоев [7], для каждого из которых в зависимости от средней температуры слоя, солености и положения слоя по толщине рассчитывается теоретическая объемная доля льда [67] и модуль упругости.

Теоретические физико-механические свойства льда, полученные по результатам расчета главы 4, представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Теоретические расчетные свойства льда

№№ слоя	Плотность слоя льда, кг/м^3	Коэффициент Пуассона	Объемная доля льда	Средняя температура слоя льда, °С	Расчетный модуль упругости, ГПа	Примечание
1	890	0,35	0,94	-0,8	8,28	граница лед-воздух
2	890	0,35	0,92	-0,5	7,91	граница лед-лед
3	890	0,35	0,87	-0,2	7,21	граница лед-лед
4	890	0,35	0,51	~ -0	2,99	граница лед-вода

Клавиша льда моделировалась цельным прямоугольником с применением оболочного элемента типа Shell. Размеры (длина, ширина, толщина) клавиши брались из экспериментальных данных. Оболочный элемент разбивался на сетку размерами не более 0,02х0,02 ед. (м). На одном из концов оболочного элемента устанавливалась жесткая заделка (запрет перемещений и моментов по оси X, Y, Z). На противоположном конце прикладывалась нагрузка. Схема оболочного элемента модели представлена на рисунке 5.1.

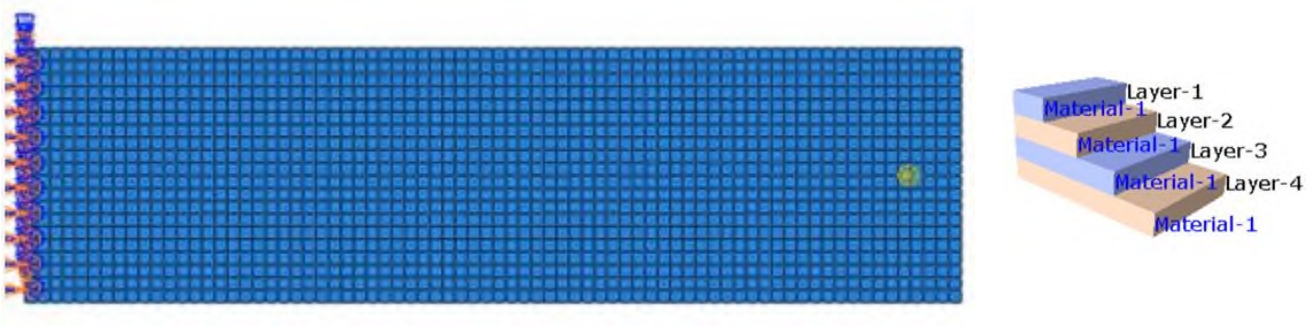


Рисунок 5.1. Схема расчетной области в пакете ABAQUS

Далее оболочный элемент делился на четыре единых слоя (Layer-1, 2, 3, 4), каждому из которых присваивались теоретические характеристики согласно его положению в толщине клавиши (табл. 5.1).

При малых деформациях и высоких скоростях деформации допускается использование чисто упругой модели льда [84], [85], [86]. При этом зона максимальных напряжений будет совпадать с зоной образования первичной трещины, которая приведет к разрушению клавиши льда [87].

5.2. Описание используемого расчетного метода и особенности его применения для решения поставленных задач

Для решения задачи изгиба покоящегося на воде льда широко применяется модель пластины на упругом основании (рис. 5.2) [88], [89], [90], [91], [92], [93].

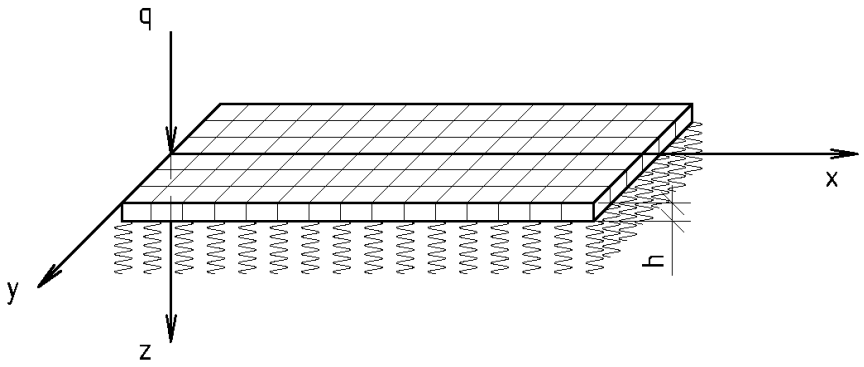


Рисунок 5.2. Пластина на упругом основании

Уравнение упругой пластины на упругом основании под действием статической вертикальной силы q имеет вид [91]:

$$D \cdot \nabla^4 \cdot w + \rho_в \cdot g \cdot w = N_z, \tag{5.1}$$

где w – прогиб пластины, $\rho_в \cdot g$ – удельный вес воды, характеризующий жесткость упругого основания, D – цилиндрическая жесткость пластины.

$$D = \frac{E_л \cdot h_л^3}{12 \cdot \left(1 - \nu_л^2\right)}, \tag{5.2}$$

$E_л$ – модуль упругости льда, $\nu_л$ – коэффициент Пуассона льда, $h_л$ - толщина льда.

Двумерная конечно-элементная модель клавиши льда (рис. 5.1) построена в программном комплексе Abaqus FEA с использованием оболочного элемента Shell. Так как конечно-элементная сетка состоит из конечных элементов, то упругое основание задается набором равномерно присоединенных к поверхности каждого элемента нелинейных пружин, суммарная жесткость которых определяется силой Архимеда, действующей на элемент клавиши льда и на ИВО. Тогда сила Архимеда, действующая на полную клавишу чистого льда:

$$F_a(w) = \rho_в \cdot g \cdot A \cdot w, \tag{5.3}$$

где w – вертикальное перемещение клавиши льда, A - площадь поверхности клавиши.

Для упрощения реализации композитной структуры клавиши льда ИВО принимаются абсолютно твердыми телами и не рассматриваются в конечно-элементной модели. Таким образом, влияние ИВО на несущую способность клавиши учитывается с помощью уменьшения объема льда на объём

вмороженного шара ИВО, определенного по формуле (в зависимости от положения его во льду (см. рис. 5.3), а также изменения жесткости упругого основания с учетом изменения этих объёмов):

$$V_{ИВО}(z) = \pi \cdot r_{ИВО} \cdot z^2 - \pi \cdot \frac{z^3}{3},$$

где $r_{ИВО}$ – радиус шара ИВО; z – координата по высоте, изменяющаяся от *0* до $r_{ИВО}$. Для определения объёма сегмента шара ИВО, который вморожен в лед, в формулу подставляются координаты положения начала z_0 и конца z_1 сегмента шара относительно льда.

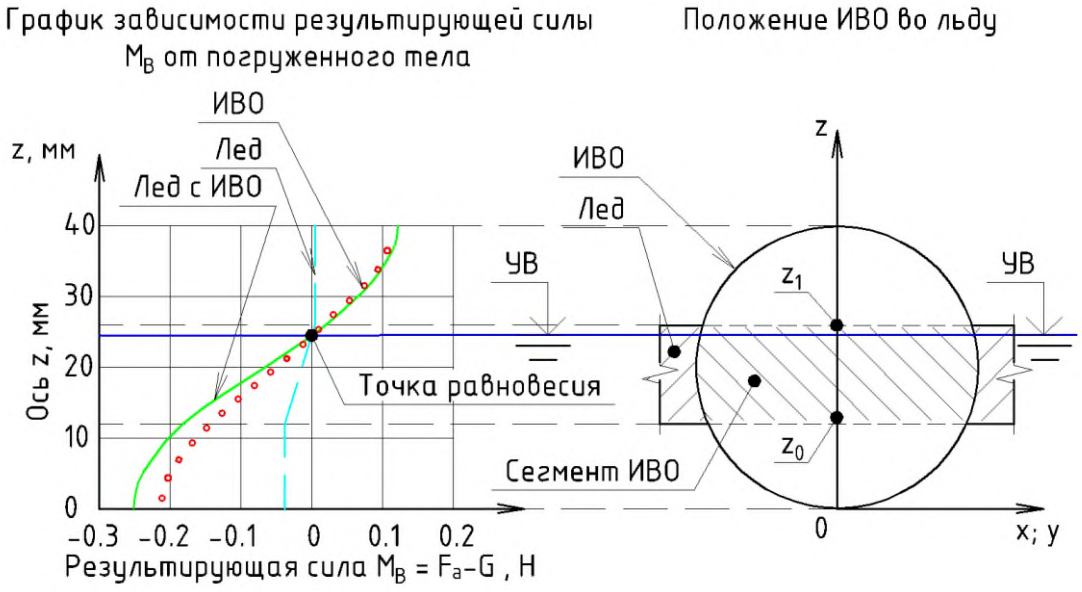


Рисунок 5.3. Схема положения ИВО⅔ в расчетном льду

Тогда объём сегмента шара ИВО:

$$V_{СЕГ_ИВО} = \left(\pi \cdot r_{ИВО} \cdot z_1^{\,2} - \pi \cdot \frac{z_1^{\,3}}{3} \right) - \left(\pi \cdot r_{ИВО} \cdot z_0^{\,2} - \pi \cdot \frac{z_0^{\,3}}{3} \right)$$

Для клавиш льда с ИВО, ввиду малых толщин, вместо сфер применялись эквивалентные недеформированные элементы - цилиндрические объекты, радиус которых определялся по формуле:

$$r_Ц = \sqrt{\frac{V_{СЕГ_ИВО}}{\pi \cdot (z_1 - z_0)}}, \qquad (5.4)$$

В случаях, когда моделировались клавиши льда с ИВО и коэффициентом адгезии = 1, жесткие объекты включались в расчетную схему для передачи растягивающих и сжимающих напряжений, возникающих во льду при изгибе (рис. 5.4 а).

В случае, когда моделировались клавиши льда с ИВО и коэффициентом адгезии → 0, цилиндрические элементы исключались (отсутствовала передача внутренних усилий), но при этом сила Архимеда от ИВО, все равно, передавалась на клавишу (рис. 5.4 б).

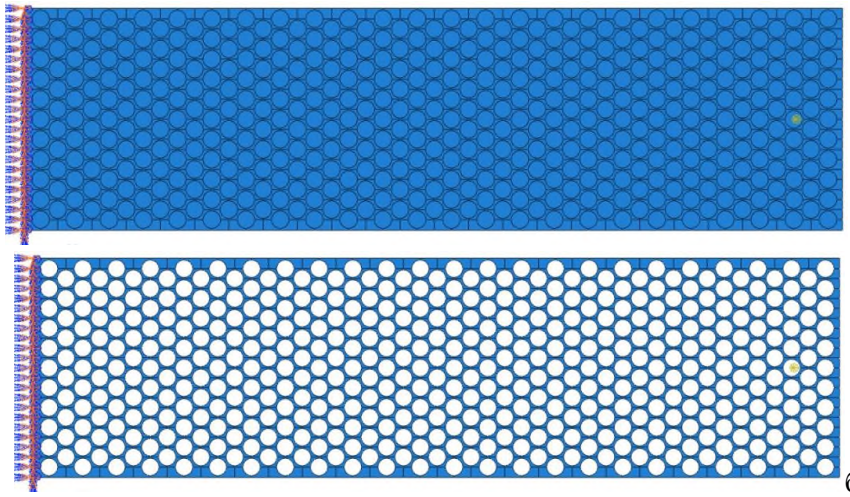


Рисунок 5.4. Клавиши льда с ИВО а) коэффициент адгезии 1; б) коэффициент адгезии →0

При этом для обоих типов клавиш воздействие воды на ИВО описывалось с помощью нелинейных пружин, присоединенных к узлам, где располагались ИВО. Жесткость пружин имеет зависимость от перемещения клавиши вдоль вертикальной оси согласно закону Архимеда и представлена на рисунке 5.5 с учетом силы тяжести и направленности действия.

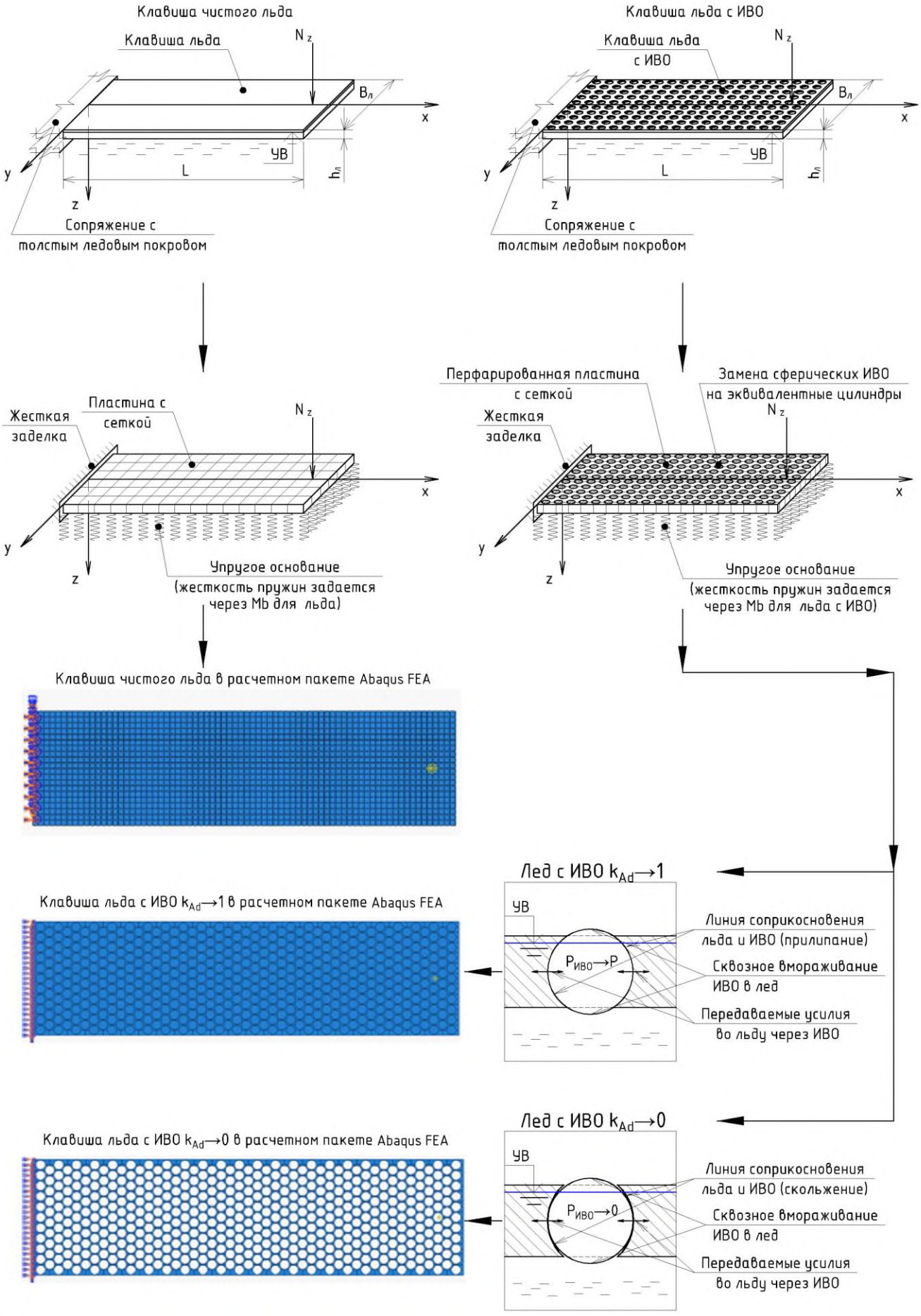


Рисунок 5.5. Схема перехода от экспериментальных данных как математической модели

При построении различных двумерных моделей клавиш для автоматизации процесса генерации элементов пружин автором использовались «макросы», разработанные на языке Python для программного комплекса Abaqus FEA.

5.3. Тестовые расчеты численной модели и сравнение с экспериментальными данными

При проверке численной модели сравнивались две величины: экспериментальное расстояние линии слома $L_ф$ и расчетное. Положение расчетной линии слома определялось через максимальную концентрацию напряжений, которая возникала при изгибе расчетной клавиши. В ходе расчета, ввиду сложной природы и неоднородности льда, теоретические параметры свойств льда варьировались в диапазоне 5-10% для коррекции расчетного расстояния линии слома с экспериментальным. Экспериментальные и расчетные данные для клавиш из чистого льда и льда с ИВО приведены в таблицах 5.2-5.4.

Таблица 5.2

Экспериментальные и расчетные данные для клавиш чистого льда

Длина L, мм	Ширина $B_л$, мм	Толщина $h_л$, мм	Расстояние до линии слома $L_ф$, мм	Расчетное расстояние до концентрации напряжений $L'_ф$, мм	Сила N_z, Н	Отклонение, %	Напряжение в верхнем слое σ_{max}, МПа	Напряжение в нижнем слое σ_{min}, МПа
1600	330	15	1595	1600	11,00	0,31	1,12	0,56
1720	255	12	1695	1720	7,60	1,45	1,67	0,84
1720	465	15	1670	1720	17,40	2,91	1,37	0,69
1720	465	15	1700	1720	15,53	1,16	1,14	0,57
1720	465	14	1685	1720	14,30	2,03	1,20	0,60

1720	370	15	1695	1720	14,14	1,45	1,42	0,71
1670	500	14	1670	1670	17,45	0,00	1,42	0,71
1720	255	12	1710	1720	7,00	0,58	1,46	0,73
1720	255	12	1695	1720	7,40	1,45	1,60	0,80
1720	255	12	1690	1720	6,10	1,74	1,15	0,58
1720	330	13	1680	1720	9,90	2,33	1,38	0,69
1720	465	12	1690	1720	11,20	1,74	1,18	0,59
1720	465	13	1700	1720	13,80	1,16	1,36	0,68
1720	255	14	1695	1720	8,10	1,45	1,27	0,64
1720	255	15	1695	1720	8,75	1,45	1,20	0,60
1720	330	15	1685	1720	12,57	2,03	1,41	0,71
4000	500	12	2090	2050	13,36	-1,00	1,37	0,69
4000	500	12	2115	2075	13,55	-1,00	1,41	0,71
4000	500	12	1980	2000	12,82	0,50	1,25	0,63
7000	500	100	5330	5290	457,00	-0,57	1,14	0,57
7000	500	100	5965	5850	514,70	-1,64	1,45	0,73

Как видно из таблицы, клавиши льда, которые по расчету ломаются в заделке, в эксперименте сломались на некотором небольшом расстоянии от нее. Это вызвано тем, что по мере приближения к заделке, толщина клавиши увеличивается пропорционально толщине льда акватории и клавиши.

Также стоит заметить, что с ростом длины клавиши, выталкивающая сила, которая играла роль упругого основания, оказывала все больше и больше влияние на клавишу, не давая ей ломаться заделке.

Среднее отклонение экспериментальной линии слома от расчетной составило 1,33% для чистого льда (табл. 5.2).

Таблица 5.3

Экспериментальные и расчетные данные для клавиш льда с ИВО½

Длина L, мм	Ширина $B_л$, мм	Толщина $h_л$, мм	Расстояние до линии слома $L_ф$, мм	Расчетное расстояние до концентрации напряжений $L'_ф$, мм	Сила N_z, Н	Отклонение, %	Напряжение в верхнем слое σ_{max}, МПа	Напряжение в нижнем слое σ_{min}, МПа
1720	465	12	780	762	36,20	-1,05	1,23	0,62
1720	465	12	825	831	38,50	0,35	1,41	0,71
1720	465	12	790	796	36,90	0,35	1,28	0,64
1720	465	13	850	900	40,00	2,91	1,31	0,65
1720	465	13	910	935	42,80	1,45	1,53	0,76
1720	255	12	830	796	20,60	-1,98	1,36	0,68
1720	255	12	795	762	19,80	-1,92	1,24	0,62
1720	255	13	900	866	22,60	-1,98	1,42	0,71
1720	255	13	920	935	23,10	0,87	1,50	0,75
1720	330	12	810	796	26,50	-0,81	1,33	0,67

Среднее отклонение экспериментальной линии слома от расчетной составило 1,37% для ИВО½ (табл. 5.3).

Таблица 5.4

Экспериментальные и расчетные данные для клавиш льда с ИВО⅔

Длина L, мм	Ширина $B_л$, мм	Толщина $h_л$, мм	Расстояние до линии слома $L_ф$, мм	Расчетное расстояние до концентрации напряжений $L'_ф$, мм	Сила N_z, Н	Отклонение, %	Напряжение в верхнем слое σ_{max}, МПа	Напряжение в нижнем слое σ_{min}, МПа
1720	465	13	440	407	9,40	-1,92	1,45	0,73
1720	465	12	405	373	7,50	-1,86	1,37	0,69

1720	465	13	435	440	8,40	0,41	1,33	0,67
1720	465	12	385	373	7,20	-0,70	1,25	0,63
1720	255	13	390	407	5,00	0,99	1,34	0,67
1720	255	12	355	338	4,00	-0,99	1,20	0,60
1720	255	13	385	373	5,00	-0,70	1,31	0,65

Среднее отклонение экспериментальной линии слома от расчетной составило 1,08% для ИВО⅔ (табл. 5.4).

Представленные в таблицах 5.2-5.4 данные показывают достаточный уровень проведенного сравнительного анализа созданной автором численной модели и подтверждают ее пригодность для численных экспериментов, по дальнейшей оценке, параметров ИВО.

5.4. Расчетные исследования по снижению усилий на основе численной модели

С целью получения более подробных данных по влиянию ИВО на прочность при изгибе льда необходимо провести многовариативные расчеты с варьированием характеристик объекта ИВО и геометрии клавиш льда. Для этого рассмотрены следующие варианты типов шариков:

- чистая клавиша льда (расчет №1)

- клавиша льда с ИВО½ (наполовину погруженная в воду) $d_{ИВО}$ = 40 мм, с коэффициентом адгезии = 1 (расчет №2)

- клавиша льда с ИВО⅔ (на ⅔ погруженная в воду) $d_{ИВО}$ = 40 мм, с коэффициентом адгезии → 0 (расчет №3)

- клавиша льда с ИВО⅞ (на ⅞ погруженная в воду) $d_{ИВО}$ = 40 мм, с коэффициентом адгезии → 0 (расчет №4).

Характеристики и свойства материала льда были взяты аналогичными прошлому расчету (см. п. 5.2). 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 последовательного расчета модели клавиши приведены в таблице 5.5.

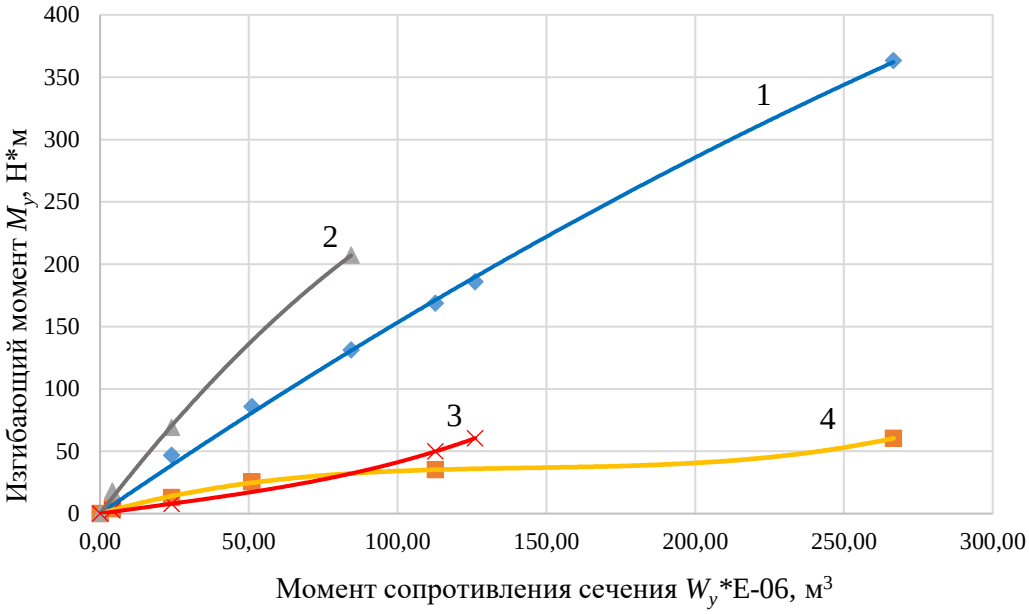
Таблица 5.5

Расчетные значения клавиш с ИВО

Толщина, мм	расчет №1		расчет №2		расчет №3		расчет №4	
	Сила N_z, Н	Расчетное расстояние до концентрации напряжений L'_ϕ, мм	Сила N_z, Н	Расчетное расстояние до концентрации напряжений L'_ϕ, мм	Сила N_z, Н	Расчетное расстояние до концентрации напряжений L'_ϕ, мм	Сила N_z, Н	Расчетное расстояние до концентрации напряжений L'_ϕ, мм
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0
5	7,52	1280	41,07	440	9,01	284	6,04	644
12	27,11	1720	82,15	840	17,4	440	12,04	1076
17,5	49,93	1720					16,06	1580
22,5	76,33	1720	120,43	1720				
26	98,01	1720			58,07	860	21,23	1652
27,5	108,12	1720			62,43	968		
40	211,15	1720					36,56	1652

Для графического представления результатов использованы подходы, наиболее часто применяемые в строительной механике и гидрометеорологии.

а)



б)

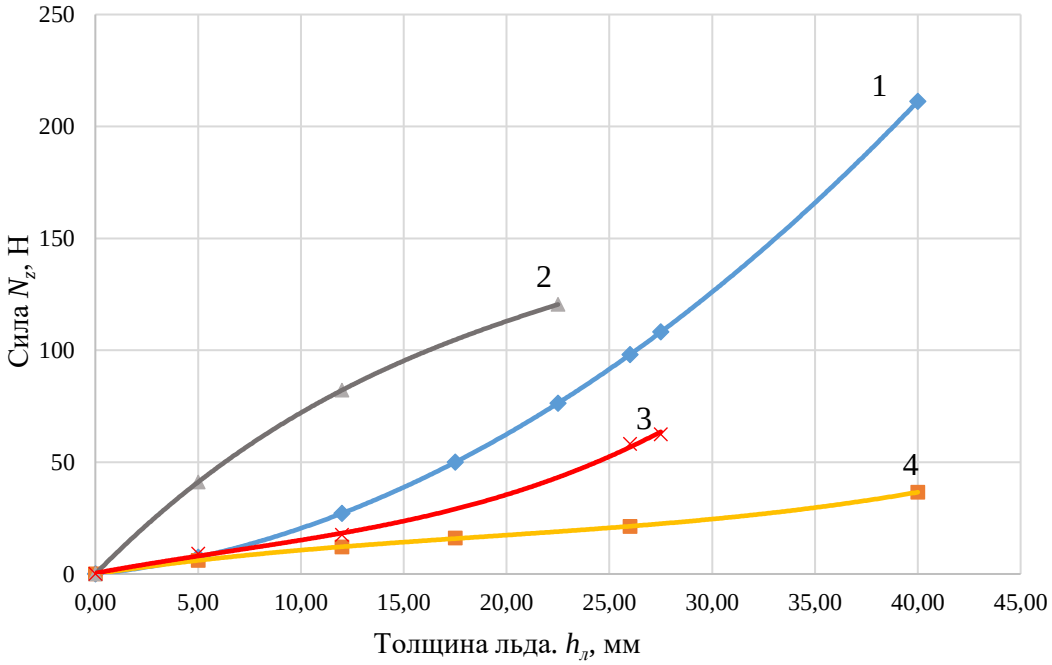


Рисунок 5.6. Графики зависимости изгибающего момента M_y (а) и силы N_z (б) от момента сопротивления сечения W_y и толщины льда $h_л$:
1 – данные для клавиш чистого льда;
2 – данные для клавиш льда с ИВО½ $d_{ИВО}$ = 40 мм с коэффициентом адгезии = 1;
3 – данные для клавиш льда с ИВО⅔ $d_{ИВО}$ = 40 мм с коэффициентом адгезии →0;
4 – данные для клавиш льда с ИВО⅞ $d_{ИВО}$ = 40 мм с коэффициентом адгезии →0.

Для сравнения полученных результатов в расчетном диапазоне данные обработаны методом наименьших квадратов с получением полинома третьей степени, вида:

$$f(y) = k1_n \cdot y^3 + k2_n \cdot y^2 + k3_n \cdot y$$

Полученные коэффициенты обработки представлены в таблице:

Таблица 5.6

Коэффициенты обработки результатов расчета

Расчётный случай №№		Коэффициенты		
		$k1$	$k2$	$k3$
Расчет №1. Чистый лед	Момент $M_y(W_y)$	$1{,}08 \cdot 10^{-6}$	$-1{,}21 \cdot 10^{-3}$	1,625
	Сила $N_z(h_л)$	$-3{,}28 \cdot 10^{-6}$	0,108	0,964
Расчет №2. Лед с ИВО½ $d_{ИВО}$ = 40 мм с коэф. адгезии = 1	Момент $M_y(W_y)$	0	$-7{,}81 \cdot 10^{-3}$	3,113
	Сила $N_z(h_л)$	$3{,}04 \cdot 10^{-3}$	-0,247	9,374
Расчет №3. Лед с ИВО⅔ $d_{ИВО}$ = 40 мм с коэф. адгезии →0	Момент $M_y(W_y)$	$1{,}52 \cdot 10^{-5}$	$-8{,}16 \cdot 10^{-4}$	0,342
	Сила $N_z(h_л)$	$2{,}75 \cdot 10^{-3}$	-0,058	1,822
Расчет №4. Лед с ИВО⅞ $d_{ИВО}$ = 40 мм с коэф. адгезии →0	Момент $M_y(W_y)$	$1{,}04 \cdot 10^{-5}$	$-4{,}50 \cdot 10^{-3}$	0,687
	Сила $N_z(h_л)$	$7{,}30 \cdot 10^{-4}$	-0,042	1,407

Сравнение нагрузки производилось в результате соотношения интегралов полиномов обработки для расчетных случаев 2-4 к расчетному случаю 1 (чистый лед) для эквивалентного диапазона. Результаты сравнения представлены в таблице 5.7:

Таблица 5.7
Результаты сравнения нагрузок

Отношение расчётного случая №№ к расчетному случаю №1		Диапазон	Отношение интегралов
Расчет №2. Лед с ИВО½ $d_{ИВО}$ = 40 мм с коэф. адгезии = 1	Момент $M_y\left(W_y\right)$	0..84.4	1.71
	Сила $N_z\left(h_л\right)$	0..22.5	2,49
Расчет №3. Лед с ИВО⅔ $d_{ИВО}$ = 40 мм с коэф. адгезии →0	Момент $M_y\left(W_y\right)$	0..126.0	0.257
	Сила $N_z\left(h_л\right)$	0..27.5	0.61
Расчет №4. Лед с ИВО⅞ $d_{ИВО}$ = 40 мм с коэф. адгезии →0	Момент $M_y\left(W_y\right)$	0..266.7	0.177
	Сила $N_z\left(h_л\right)$	0..40	0.23

Таким образом, можно сделать заключение, что при данных характеристиках льда и воды использование ИВО:

- на ½ погруженных в воду ($d_{ИВО}$ = 40 мм, с коэффициентом адгезии = 1) приводило к армированию льда с увеличением вертикальной нагрузки в 2,5 раза и изгибающего момента в 1,71 раза;

- на ⅔ погруженных в воду ($d_{ИВО}$ = 40 мм, с коэффициентом адгезии →0) приводило к ослаблению льда с уменьшением вертикальной нагрузки в 1,6 раза и изгибающего момента в 3,89 раза;

- на ⅞ погруженных в воду ($d_{ИВО}$ = 40 мм, с коэффициентом адгезии →0) приводило к ослаблению льда с уменьшением вертикальной нагрузки в 4,4 раза и изгибающего момента в 5,64 раза.

Последовательные расчеты, выполненные в пакете ABAQUS, показали, что наилучшим образом себя показал вариант льда с ИВО по расчетному случаю №4 - клавиша льда с ИВО⅞ (на ⅞ погруженные в воду, $d_{ИВО}$ = 40 мм, с коэффициентом адгезии →0). С использованием этого варианта происходит уменьшение прочности льда на изгиб в 5,65 раза, а вертикальную силу в 4,4 раза.

5.5. Использование предлагаемой технологии в натурную величину

Анализ результатов исследований показал, что правильный подбор материалов и геометрических размеров ИВО играет ключевую роль в создании перфорации льда с целью снижения нагрузок, передаваемых через лед, на ГТС. Но, поскольку все экспериментальные исследования проводились в масштабе, необходимо выполнить уточняющие расчеты и вывести зависимости по определению ключевых параметров ИВО в натурную величину, которая определит геометрию проводимой перфорации льда.

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

$$d_{ИВО} = 1.2 \cdot h_л, \tag{5.5}$$

Предложенный ранее график (рис. 5.6) можно также представить в нужном масштабе с использованием условий подобия, представленных в главе 3 табл. 3.4 (геометрическое, кинематическое и динамическое):

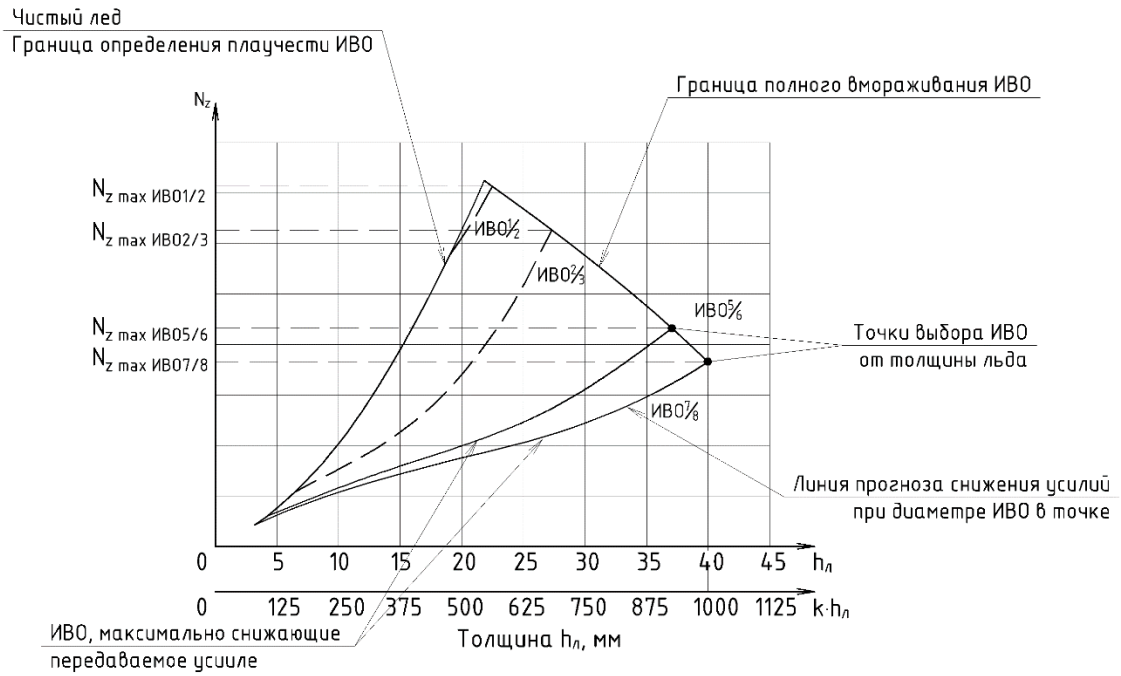


Рисунок 5.7. График зависимости вертикальной силы N_z от толщины льда $h_л$, в пересчете в масштаб 1:25

В таком виде график позволяет оценить максимальную толщину льда при использовании ИВО (для создания перфорации льда) в зависимости от его положения в воде, а также оценить снижение передаваемой нагрузки при изменении толщины льда в течение цикла.

Снижение предельных ледовых усилий на ГТС с помощью предлагаемой технологии, также оказывает влияние и на запас прочности сооружения (рис. 5.8).

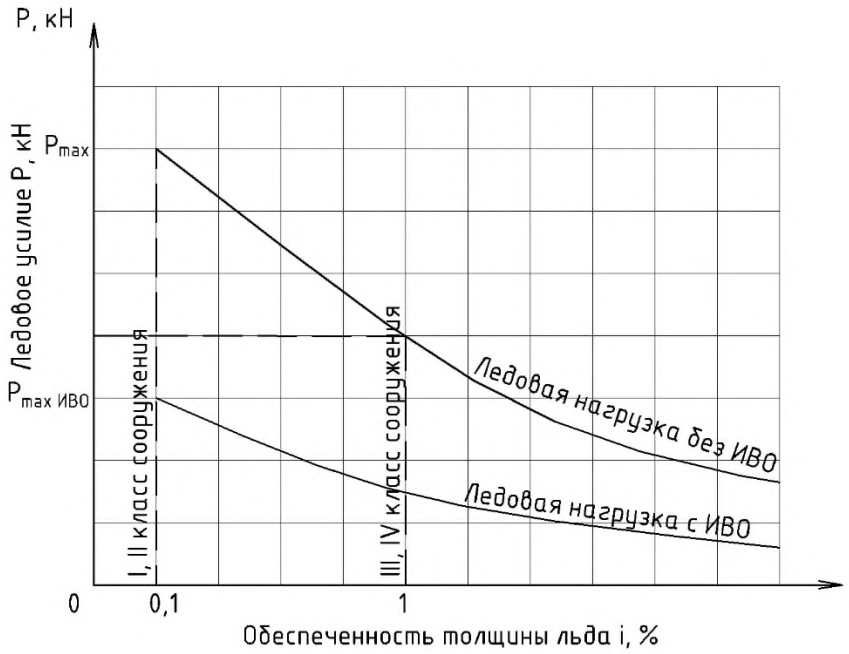


Рисунок 5.8. График сравнения расчетного ледового усилия без ИВО с расчетным ледовым усилием с ИВО в зависимости от обеспеченности достигаемой толщины льда

Снижение передаваемых через лед усилий с помощью предлагаемой технологии позволяет снизить прочностные характеристики льда при расчетной толщине льда (по СП 38.13330 [7]), воздействующего на гидротехнические III и IV классов сооружения, а также повышает запас прочности для I и II классов.

Плотность материала шарика $\rho_{ИВО}$, для обеспечения необходимого погружения и положения его в ледовом покрове (без дополнительных искусственных пор), является зависимостью от плотности воды акватории $\rho_в$ (с учетом солености) и его расчетного положения в воде $h_п$, полученная из условия равновесия действующих сил на шар (силы Архимеда и силы тяжести):

$$\rho_в \cdot g \cdot \left(\pi \cdot r_{ИВО} \cdot z^2 - \pi \cdot \frac{z^3}{3} \right) = \rho_{ИВО} \cdot g \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{ИВО} \right),$$

где $z = 2 \cdot R \cdot h_п$ и определяется по формуле:

$$\rho_{ИВО} = h_п^{\,2} \cdot \rho_в \cdot (3 - 2 \cdot h_п), \qquad (5.6)$$

Для предотвращения возможного полного вмораживания ИВО в ледовый покров в результате его неравномерного нарастания (ввиду сильных колебаний температуры воздуха) предлагается заложить коэффициент запаса по толщине льда в диаметр ИВО. В этом случае на основе зависимости плотности ИВО для льда плотностью 890 кг/м^3 получим ИВО с расчетным положением в воде $h_п$, равным 5/6. Такое положение не является максимально эффективным, как с ИВО⅞, но позволяет избежать полного вмораживания в лед, при этом снижение прочности и передача усилий отличается не более, чем на 10-15%.

На рисунке 5.9 представлена схема (в масштабе) использования ИВО⅚ при толщине льда на акватории порта, равной 1,0, и движении судна «Михаил-Сомов»:

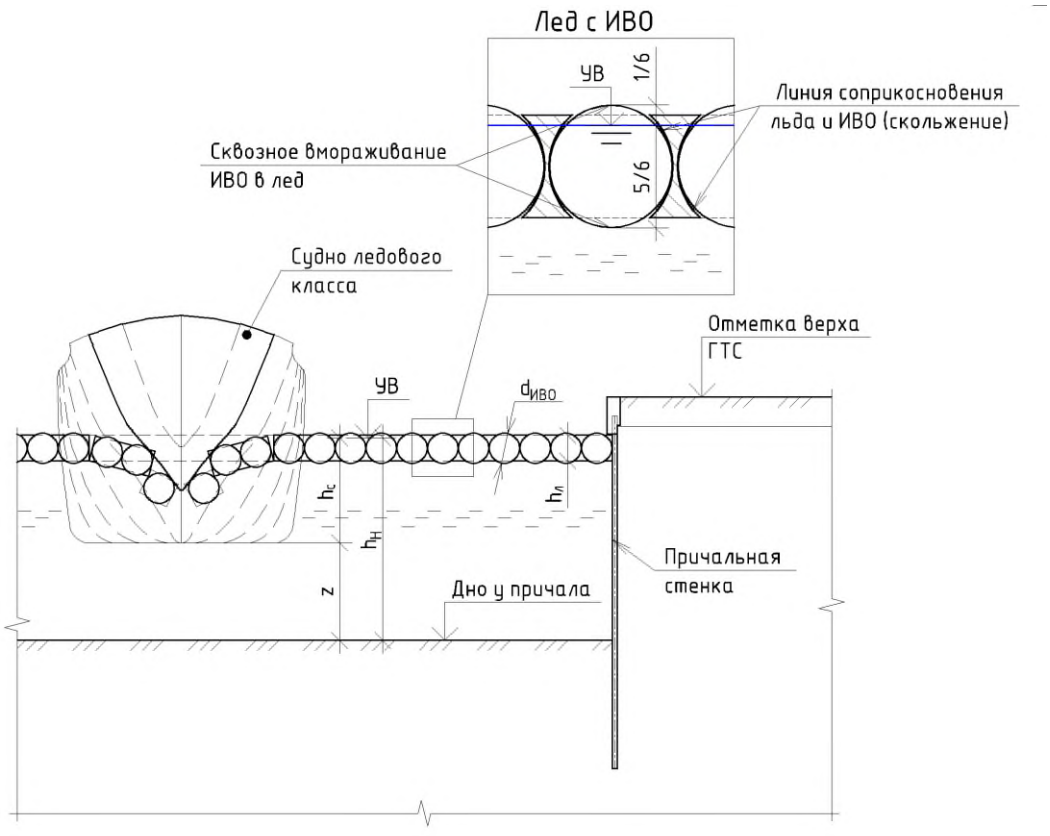


Рисунок 5.9. Масштабная схема применения ИВО⅚ $d_{ИВО}$ = 1,2 м для льда 1 м

Схема помогает визуально оценить применимость ИВО для судов аналогичных размеров.

5.6. Исследование возможности использования предлагаемой технологии

В ходе исследований возможности использования предлагаемой автором технологии были установлены внешние параметры, которые оказывали влияние на перфорацию льда с помощью ИВО и создавали некоторые ограничения их применения.

Такими факторами являются толщина льда, глубина акватории порта, соленость воды в зоне применения, волнение, ветер, приливно-отливные и ветровые течения, эксплуатируемые суда.

Толщина льда, как и соленость воды, являются ключевыми факторами для расчета и применения ИВО. С использованием ранее предложенной формулы (5.5) и на основании инженерных изысканий и данных по мониторингу толщины льда в регионе, определяется диаметр элемента предлагаемой технологии. На основании солености и формулы (5.6) через плотность воды, которая напрямую зависит от солёности, определяется его посадка в воде. Кроме того, в свою очередь, пересчитанный на нужную натурную величину график (рис. 5.7) позволит оценить эффективность снижения нагрузки при изменении толщины льда в течение цикла для рассчитанного ИВО.

Течение, ветер, приливно-отливные течения также оказывают влияние на ИВО во время осенне-весеннего периода. Следует обратить внимание, что в работе автор рассматривает применение новой технологии с технической точки зрения как свободно плавающие объекты. Создаваемое перемещение водных масс, вызванное внешними условиями, которое направлено на вымывание ИВО с защищаемой территории, представляет опасность, если оставить без наблюдения. Это не касается частных случаев, когда внутри акватории течение круговое (или

практически отсутствует) или движение волны направлено к берегу. Так или иначе, без дополнительных инженерных мероприятий эти явления могут снизить плотность и, как следствие, эффективность предлагаемой технологии. Для снижения влияния этих факторов в первой итерации в работе рассматривается применение новой технологии на закрытых акваториях портов и каналов с шлюзовыми системами, а для регионов с приливно-отливными течениями в зоне фарватера необходимо, к примеру, дополнительно выставлять боновое заграждение или применение якорения определенных рядов ИВО как предложено в [5], [6].

Используемые суда в зоне предполагаемой защиты с применением ИВО являются третьим важным фактором. В зависимости от эксплуатируемых судов определяют глубину морских каналов, фарватеров и зон маневрирования $h_н$ для безопасности навигации и мореплавания, которую определяют (СП 444.1326000 [94]), по формуле

$$h_н \geq h_c + \Delta h + z_1 + z_2 + z_3 + z_0$$

h_c – максимальная осадка судна в грузу, м;

Δh - поправка на изменение осадки расчетного судна при плотности воды, м;

z_1 - минимальный навигационный запас (в зависимости от грунтов), м;

z_2 - волновой запас на погружение оконечности судна при волнении, м;

z_3 - скоростной запас на изменение осадки судна на ходу, м;

z_0 - запас на крен судна, м.

В случае применения на акватории предлагаемой технологии коэффициенты z_2, z_3, z_0 определяются без изменений. Для коэффициента z_1 по нормам дополнительно вводится поправка на увеличение осадки судна при обледенении, равное 0,1 м при расчетных судах водоизмещением не более 20 тыс. т. Ввиду того, что плотность ИВО близка к плотности льда, как и диаметр ИВО к толщине льда, при свободном движении судна дополнительных ограничений не требуется.

Для обеспечения безопасной швартовки и сближения с ГТС-конструкцией типа больверк (или любой другой сплошной стенкой) швартовку необходимо выполнять на расстоянии 1,5 - 2 $d_{ИВО}$ (от вертикальной стенки, чтобы обеспечить свободное движение ИВО при ломке льда. В противном случае необходимо убедиться, что между днищем суда и дном обеспечивается расстояние на 1,5 $d_{ИВО}$. В случае сближения судна с ГТС сквозной конструкции никаких ограничений не требуется.

Что касается 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» [95]. Из преимуществ, в результате снижения прочности льда на изгиб суда класса Ice1-Ice3 смогут самостоятельно передвигаться по акватории, а для судов класса Arc нет ограничений по сплоченности льда.

Схематическую область применения предлагаемой технологии можно представить в виде графика (рис. 5.10).

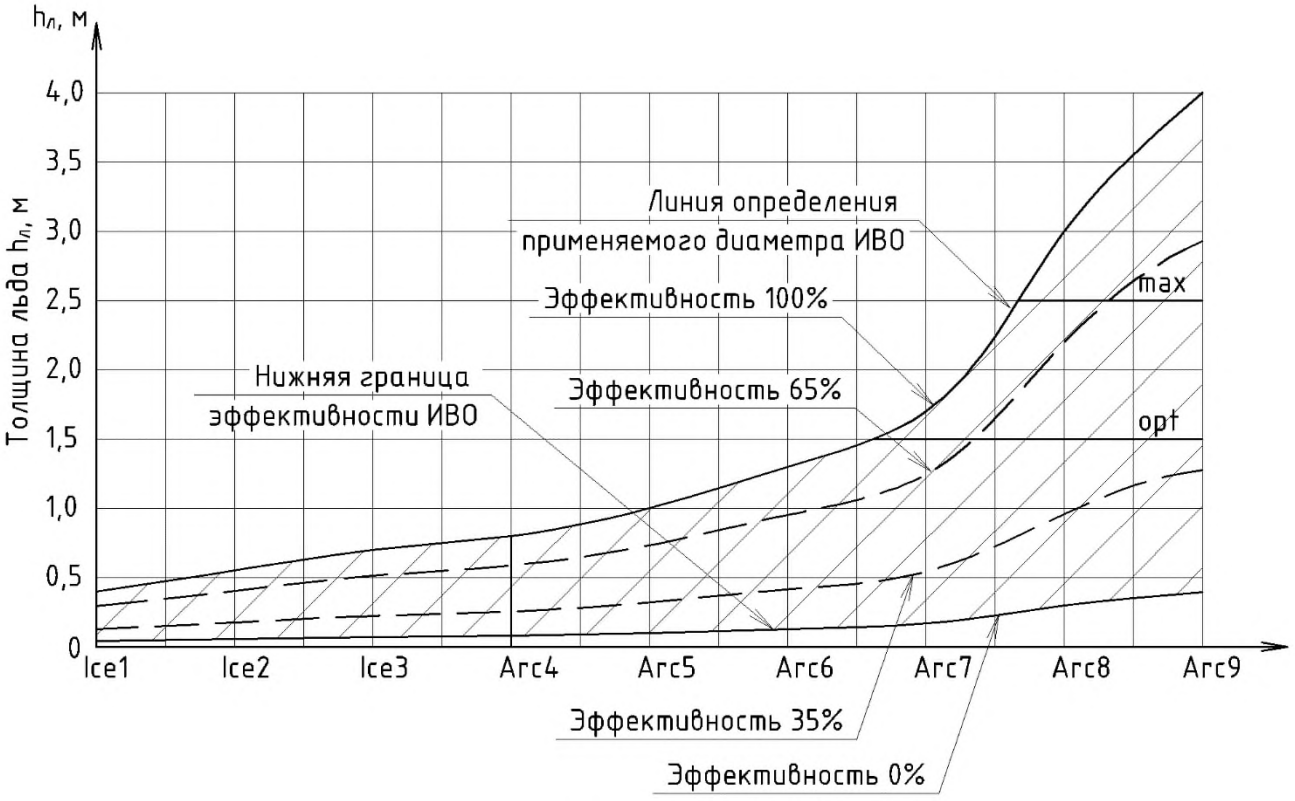


Рисунок 5.10. График области применения ИВО в зависимости от категории судна

График области применения ИВО (рис. 5.10) построен на основе данных о технических характеристиках судов, а также с применением данных (рис. 5.6, 5.7), полученных в этой работе.

В зоне предполагаемой защиты на основании инженерных изысканий определяется максимально возможная толщина льда. Зная толщину льда в регионе, можно выбрать судно подходящего арктического класса и рассчитать максимальный возможный диаметр и плотность ИВО согласно ранее предложенным зависимостям. На графике (рис. 5.10) «линия определения применяемого ИВО» соответствует максимально допустимой толщине льда, которую судно определенного класса способно преодолеть.

Нижняя граница эффективности ИВО показывает минимальную эффективную толщину льда (при выбранном диаметре ИВО5% для максимальной толщины), до которой судну будет легче передвигаться по замерзшей акватории (без ИВО), при этом горизонтальные усилия, передаваемые на ГТС, будут меньше, чем при использовании проектных ИВО. Движение судна через ледовый покров толщиной ниже эффективной или при отсутствии льда (в летний период) будет соответствовать движению судна через мелко битый лед.

В течение навигационного периода толщина льда на акватории меняется. Для оценки среднегодовой эффективности ИВО внутри выделенной области (рис. 5.10) построены дополнительные линии эффективности ИВО (max и opt). На основании данных о морозо-днях в регионе и согласно месячному прогнозу по изменению толщины льда, можно оценить среднюю эффективность применения ИВО за весь навигационный период.

Применение гидрофобных ИВО для создания перфорации возможно при любой толщине льда, если соблюдается диаметр элемента. На графике на основании открытых источников, а также норм РД 31.31.21-81 [96] горизонтальными линиями отмечены наиболее встречаемые толщины льда при эксплуатации ГТС. Распространенной толщиной является лед до 1,5м. В этом случае ИВО подходит как для ГТС закрытых акваторий портов, так и шлюзовых

каналов и их берегоукреплений. При толщине от 1,5 до 2,5м, что встречается в регионах крайнего Севера, использование ИВО возможно для закрытых акваторий портов с учетом ограничений при швартовке судна вблизи вертикальных ГТС. Для судоходных каналов ограничений нет. Для толщины льда свыше 2,5м рекомендуется использовать ИВО только в судоходных шлюзовых каналах, в других случаях их применение в свободно плавающем состоянии считается нерациональным.

5.7. Исследование возможности использования предлагаемой технологии снижения нагрузки, передаваемой через лед на ГТС

Ввиду ограниченных экономических возможностей провести реальную, полномасштабную проверку по реализации представленной в работе технологии снижения передаваемых через ледовый покров нагрузок на гидротехнические сооружения в закрытых акваториях портов арктических морей не представляется возможным. В качестве альтернативы была произведена численная оценка эффективности ИВО путем внедрения модели ИВО в Российскую платформу, разработанную Компанией ООО «СТЕОР-НСБ» для имитационного моделирования безэкипажного судовождения (ПМБС) в рамках Национальной Технологической Инициативы (НТИ) Российской Федерации «Маринет» (протокол Межведомственной рабочей группы под председательством А.Р. Белоусова НТИ №1 от 28.03.2019).

Для оценки технических решений, предложенных автором, в ООО «СТЕОР-НСБ» был предоставлен программно-аппаратный комплекс ПМБС, ориентированный на проведение проверки цифрового оборудования морских автономных судов и береговой инфраструктуры, для которых в виртуальном пространстве создается цифровой образ событий, происходящих в акватории выбранного порта. Для проведения исследований в соответствии с п.1.2 главы 1 в качестве порта был выбран порт Сабетта, расположенный в Обской губе.

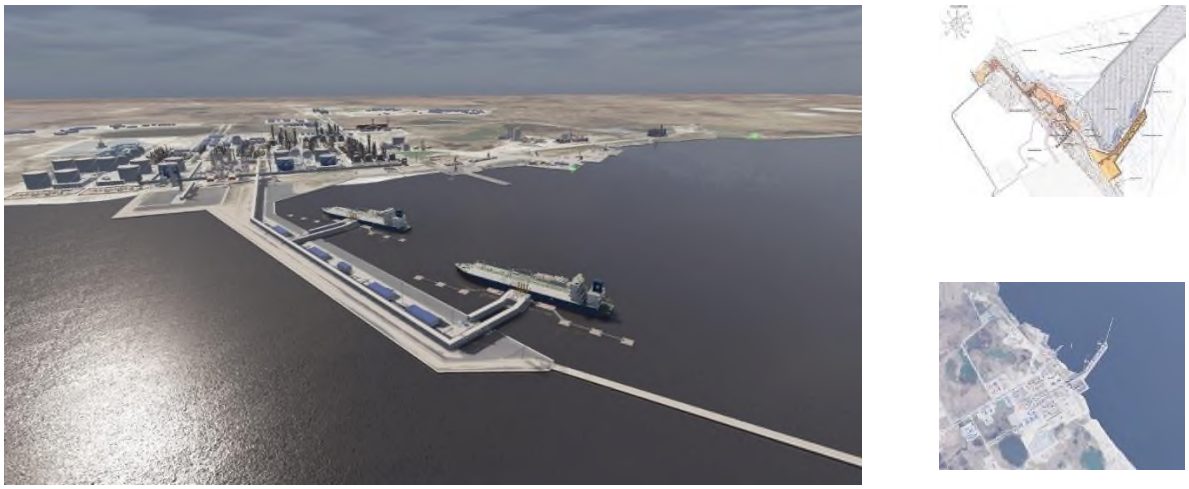


Рисунок 5.11. Цифровая модель порта Сабетта, построенная на базе открытой строительной и картографической информации

Для имитационного моделирования работы ИВО в качестве устройств снижающих передаваемых через ледовый покров нагрузок на ГТС порта Сабетта, на основе строительной, картографической, батиметрической, гидрологической информации и наблюдений за метеоусловиями, был создан цифровой образ порта (рис. 5.10). Цифровая модель порта имеет возможность имитировать приливные явления, течения в акватории порта и позволяет в цифровом пространстве проводить испытания движения судов к ГТС.

Для имитации движения судна в акватории порта ООО «СТЕОР-НСБ» была создана математическая модель ледокола проекта 21900М отвечающиего категории Icebreaker-7, которая была построена в виртуальном пространстве в натуральную величину и помещена в цифровой образ порта Сабетта.

Для внедрения в моделирующую среду ПМБС дрейфующего, сферического ИВО, на базе имеющейся в ПМБС модели движения судна (совместно с сотрудником ООО «Стеор-НСБ» А. А. Малюгиным) была создана модель ИВО с учетом ранее выполненных наработок автора [47], [64], [97], [98], [99], [100], [101] и с учетом основных принятых допущений:

1. математическая модель ИВО базируется на уравнениях движения ПМБС для твердого тела с 6-ю степенями свободы (по трем координатам и трем углам поворота), которые включают основные силы, действующие на ИВО: гидродинамические, аэродинамические и волнового воздействия, а также силы

контакта судна с ИВО на основе «контакта предварительно заданных оболочек». Как следствие ИВО описаны с помощью широко известной модели твердого тела с шестью степенями свободы, используемой при описании движения судов, для которой автором принято два допущения:

- для описания движения вращающегося, шарообразного ИВО в плоскости его ватерлинии единственным образом выбирается “направление его основного движения”, которое для ИВО становится расчетным аналогом “носа”;

- силовое взаимодействие ИВО между собой и с ГТС описано расчетом контакта на базе расчётной библиотеки Bullet Physics, для визуализации используется графический пакет Unity 3D.

2. модель поля ИВО реализована “как система дискретных элементов” и позволяет моделировать движение системы большого числа (порядка 15 000 тысяч) ИВО или других плавучих объектов разной природы (битый лед, мусор, технологические объекты и т.д.).

Подробное описание модели ИВО со всеми принятыми допущениями для симметричной задачи и формулами, используемыми для расчета сил внешнего воздействия, представлено в Приложении 3. По результатам внедрения работ автора, а также по результатам проведенных ниже исследований для развития и проверки моделирующей среды ПМБС автором получен акт о внедрении, представленный в Приложении 1.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи, рассматриваемые далее в работе:

1. внедрить в моделирующую среду ПМБС дрейфующие, сферические ИВО;

2. в полученной моделирующей среде исследовать вопрос взаимодействия ИВО с ГТС и оценить изменение передаваемых усилий на причальную стенку от внешнего источника нагрузки, в качестве которого выбрано судно ледового класса проекта 21900М;

3. оценить изменение плотности расположения ИВО (вынос за пределы защищаемой зоны) и то, как оно влияет на эффективность предлагаемой технологии, после прохождения судна;

4. изучить воздействие ветра и подводных течений на ИВО как на свободно плавающие объекты.

После проведения серий испытаний на базе платформы имитационного моделирования с применением созданной модели ИВО в среде ПМБС были получены представленные ниже результаты:

1. Оценка передаваемых усилий через лед и лед с ИВО на причальную стенку ГТС

Ввиду ограничения вычислительных мощностей и сложности решаемой задачи, в моделирующей среде на базе порта Сабетта были выбраны расчетные зоны (рис. 5.12), которые позволят оценить снижение передаваемых через ледовый покров усилий на гидротехнические сооружения с помощью предлагаемой технологии. Для уменьшения числа элементов, расчетная зона ограничивалась шириной в два корпуса судна и длиной в три длины судна и составила: 360х60 м. При это сохранялись всевозможные воздействия указанные в приложении 3

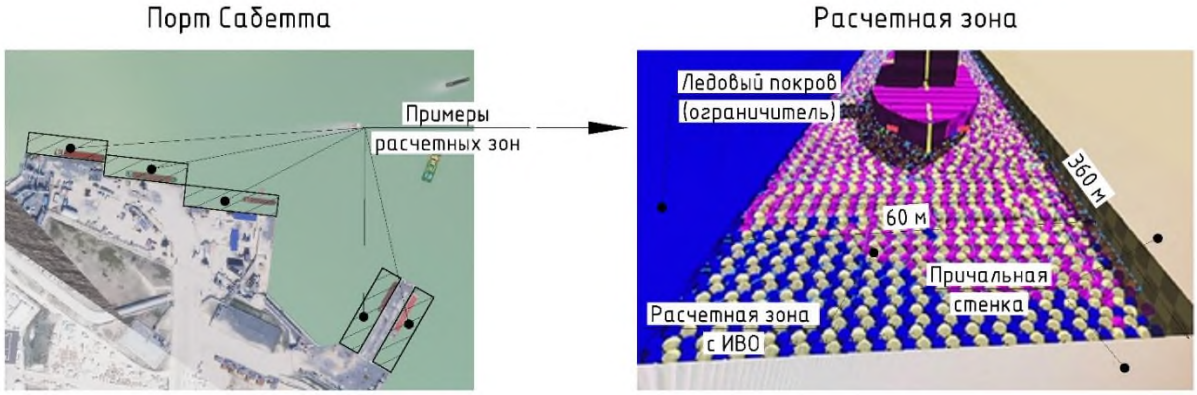


Рисунок 5.12 Примеры расчетных зон на базе порта Сабетта

В качестве внешнего источника сил, было выбрано судно ледового класса проекта 21900М. Скорость движения судна, согласно техническим характеристикам судна (Icebreaker7) и нормам НД 2-020101-072 [95], составляла 2

узла. Прочностные характеристики льда в расчетной зоне (с ИВО и без) задавались аналогично как в математической модели, для толщины льда $h_л$ = 1,25 м. ИВО, согласно рекомендациям, в моделирующей среде создан плотностью 926 кг/м^3 (что соответствует ИВО5%) и диаметром 1,5 м (относительно льда 1,25м).

Судно в расчетной зоне двигалось вдоль причальной стенки на расстоянии 16 м и 4,5 м (рис. 5.13). Во время движения судна со скорость 2 узла, считывались усилия фронтальные и боковые (в сторону причальной стенки), создаваемые судном, как внешним источником сил, которые передавались на ГТС.

Моделирующая среда имеет ряд вычислительных ограничений, поэтому для возможности их компенсации и проведения сравнительных испытаний, нами были выполнены следующие действия:

1. проводилось относительное сравнение усилий, которые компенсировали ошибки учета абсолютных значений отдельных сил при их численном определении;

2. лед моделировался цельным вычислительным облаком, размеры которого менялись при достижении прочности на сжатие или изгиб.

Полученные значения передаваемых усилий через сплошной лед и лед с ИВО усреднялись на расчетном участке и соотносились друг с другом. Отношение результатов приведены в табл. 5.8.

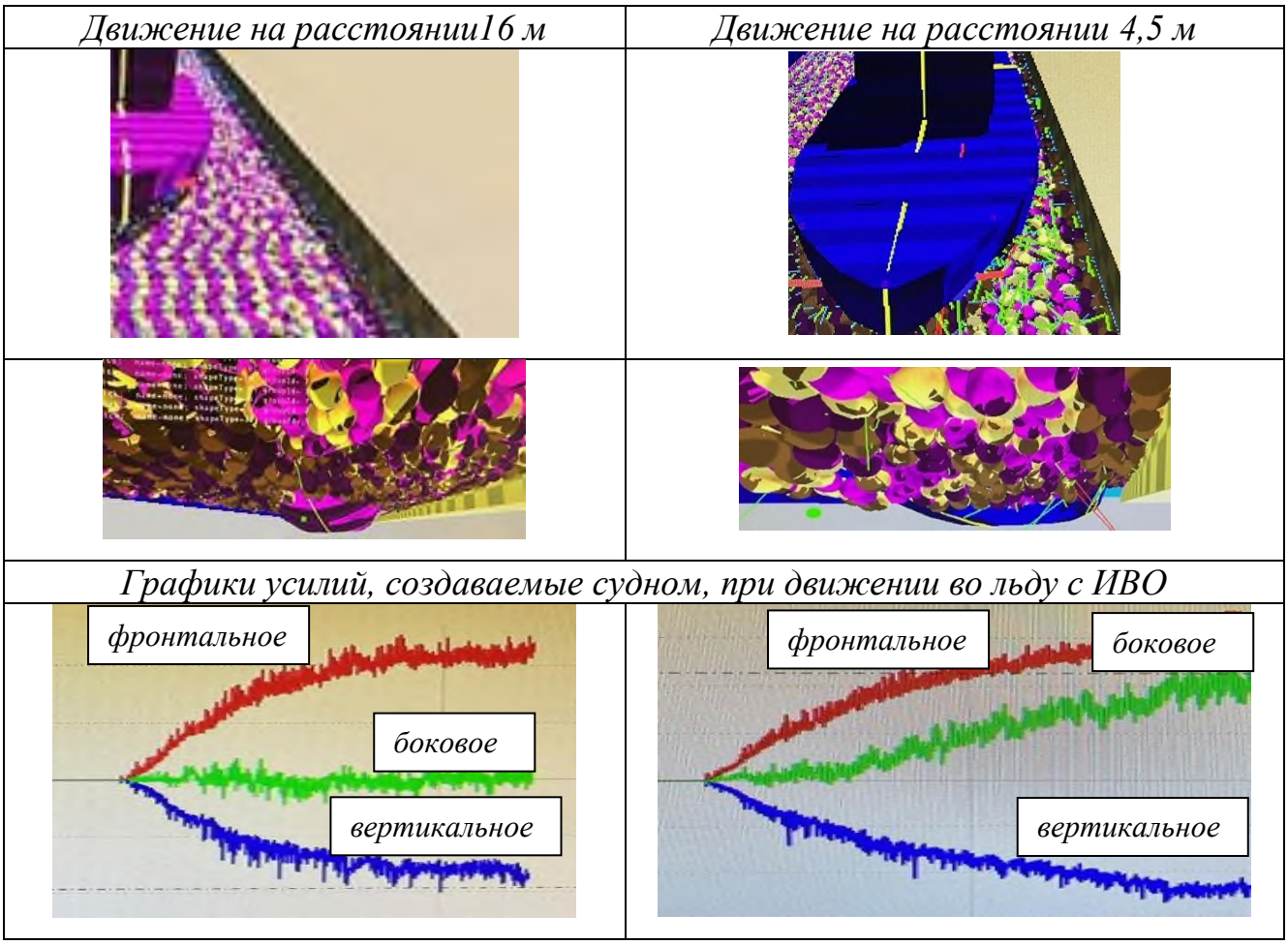


Рисунок 5.13 Движение расчетного судна вдоль причала на расстоянии 16 и 4,5 м. Графики усилий, создаваемые судном.

Таблица 5.8

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 исследований, проведенных в моделирующей среде, было установлено, что при движении на расстоянии 16м от причальной стенки, передаваемое через лед с ИВО усилие на ГТС было ниже в 3,65 раза по сравнению с усилием передаваемое через сплошной лед. В тоже время, при

движении на расстоянии 4,5 м от причала, передаваемое усилие оказывалось ниже в 3,23 раза. В отличии от движения на расстоянии 16м, прохождение судна вблизи сплошной стенки, вызывало небольшое скопление ИВО в 2 уровня, что создавало дополнительное выталкивающее (удерживающие) усилие.

2. Вынос ИВО за пределы защищаемой зоны после прохода судна

В качестве дополнительной проверки представленного в п. 3.2 главы 3 предположения о том, что при прохождении судов через поле льда с ИВО будет происходить существенный вынос ИВО из зоны защищаемого ими гидротехнического сооружения, была выполнена проводка судна через поле свободно плавающих ИВО (без льда) в моделирующей среде (рис. 5.14).

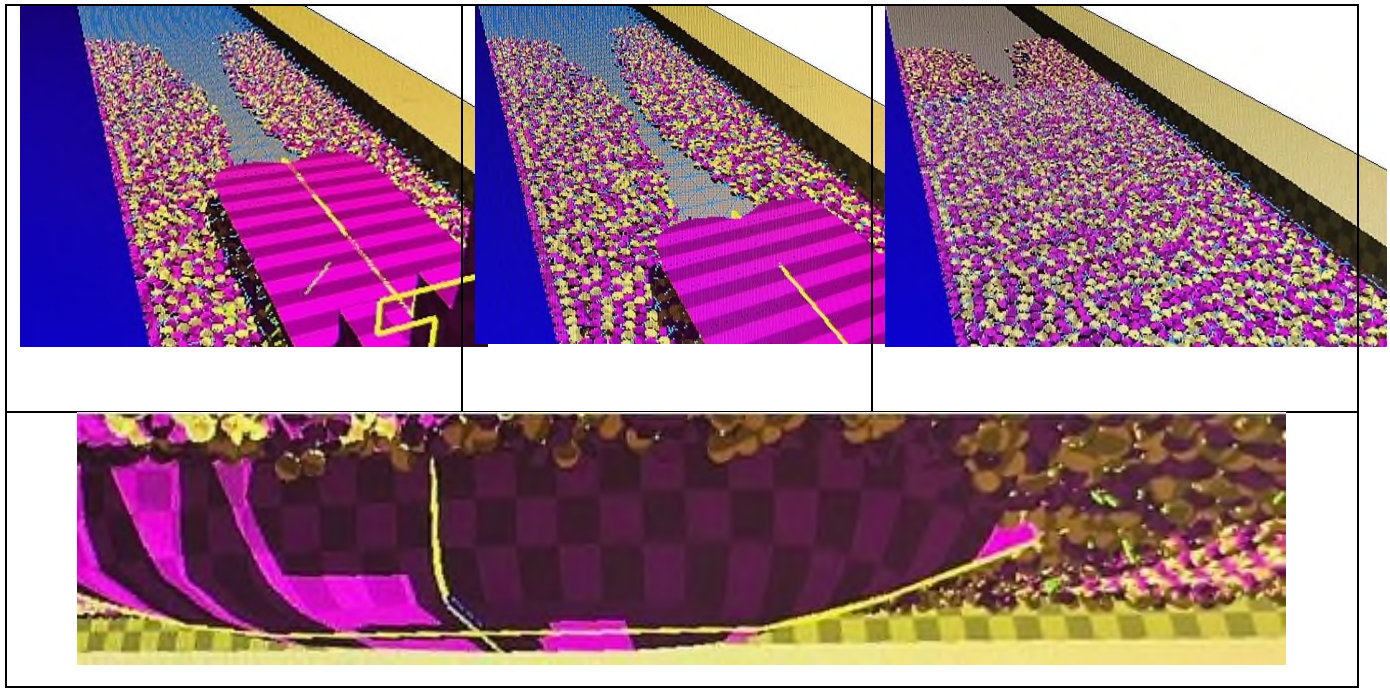


Рисунок. 5.14. Взаимодействие свободноплавающих ИВО с судном в канале.

В результате серий испытаний не было зафиксировано значительного выноса (потери) ИВО с территории защищаемой акватории порта после проводки судна на малых ходах в летнее время, что также подтверждается выводами, полученными по плотности распределения табл. 5.9.

Таблица 5.9

Результаты обработки по критерию Стьюдента

Вид экспериментальной проверки	Расчетный уровень значимости *p*		
	y_0	y_1	y_2
Лабораторный эксперимент в ААНИИ	1	0,997	0,995
Моделирующая среда ПМБС	1	0,995	0.994

3. Влияние основных погодных явлений на ИВО в защищаемой акватории

В качестве сезонных погодных явлений были рассмотрены: ветер, течение, приливно-отливные течения, волнение. Погодно-климатические данные были взяты из инженерно-гидрометеорологических изысканий по порту Сабетта и воссозданы в моделирующей среде ПМБС с использованием ИВО. В результате исследований выявлено малое влияние ветрового воздействия, сильное влияние мало вероятных продолжительных течений одного единственного направления (рис. 5.15);

Течение *Ветер*

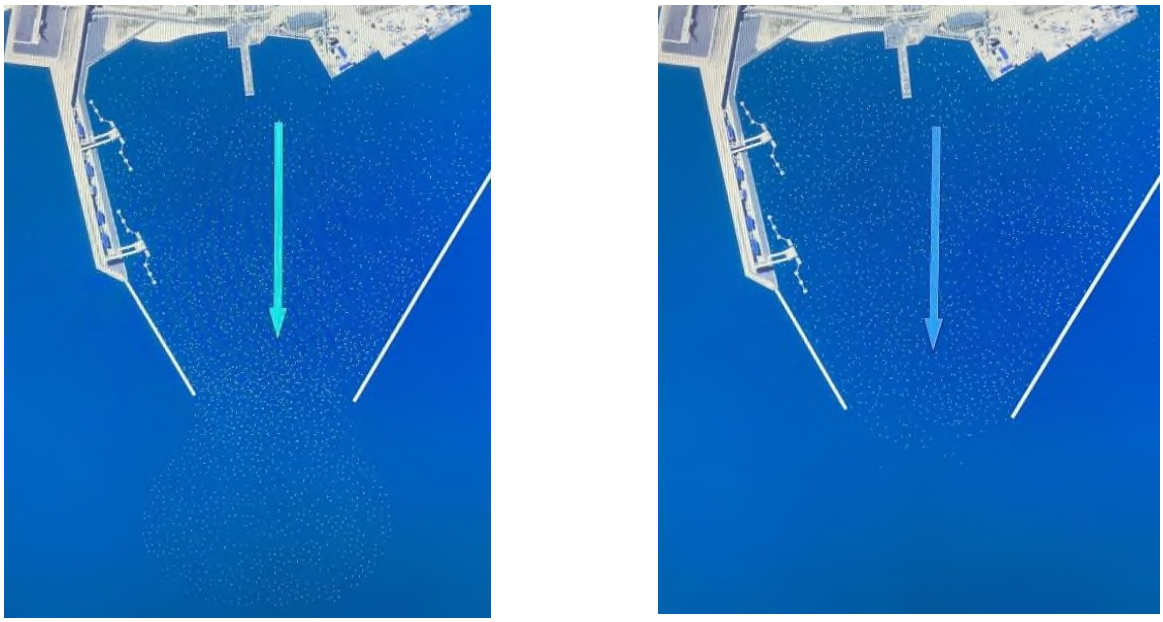


Рисунок 5.15. Воздействие течения и ветра на ИВО

Выполнено взаимодействие ИВО при волновых воздействиях с наклонной (рис. 5.16) и вертикальной стенками (рис. 5.17) ГТС.

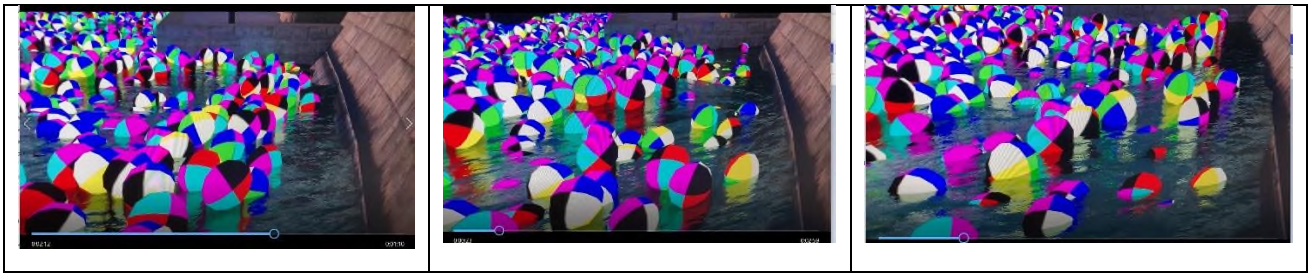


Рисунок 5.16. Взаимодействие ИВО с наклонной стенкой ГТС при волновом воздействии

При продолжительном взаимодействии с наклонной стенкой ИВО выстраиваются в параллельные ей скопления, пропорционально длине волны. При взаимодействии с вертикальной стенкой такого эффекта не наблюдается, при этом сохраняется иррегулярное распределение ИВО, даже в штормовых условиях.



Рисунок 5.17. Взаимодействие ИВО с вертикальной стенкой ГТС при волновом воздействии

В результате проигрывания множества разных сценариев по отдельным и комбинированным погодным явлениям, по их продолжительности и направлению воздействия, были определены условия по использованию предлагаемой технологии, и дано уточнение описанной в предыдущем параграфе методики по применению ИВО на практике. Таким образом, нами были подтверждены выводы о возможности использования ИВО на закрытых акваторий портов при различных погодных явлениях, а в случае образования «критических выносов» проблема может решаться якорением фрагментами, наружного периметра

Выводы по Главе 5

1. С использованием результатов экспериментального исследования разработана численная двумерная модель клавиш льда в расчетном комплекса Abaqus FEA, базирующаяся на модели Винклера (пластина на упругом основании, защемленная одним концом). Были проработаны и просчитаны свыше 40-ка вариантов, каждый из которых состояла из более чем 800-1600 элементов и имел до 1800 связей. Для работы с ними использовались автоматизированные процессы генерации пружин и демпферов.

2. На основе разработанной численной модели была проведена вычислительная оценка влияния изменения параметров ИВО на прочность клавиши льда с проработкой более 20-ти расчетных случаев. Варьирование таких параметров как плотность ИВО (от 550 до 957 кг/м^3 – изменяющая их положение во льду) коэффициент адгезии (стремящийся к нулю или единица) позволило построить график для дальнейшего прогнозирования эффективности применения ИВО и поиска оптимальных вариантов.

3. Выполненный комплекс расчетов показал, что использование масштабных ИВО⅞ (на ⅞ погруженные в воду), с безразмерным коэффициентом адгезии, стремящимся к нулю, позволяет снизить прочность льда на изгиб в 5,65 раза, а вертикальную силу в 4,4 раза, что является максимально возможным снижением.

4. Предложена методика перерасчета и определения геометрических характеристик ИВО для обеспечения планируемой перфорации льда в реальных условиях (на базе лабораторных масштабных данных главы 3).

5. На основе полученных в ходе исследований результатов автором сформулированы ограничения использования ИВО, области применения и основные принципы подбора и эффективной эксплуатации ИВО для текущего технического состояния предлагаемой технологии: как свободно плавающих

объектов, так и якорения их отдельных рядов. Для расширения областей использования необходимы дальнейшие исследования.

6. Произведено внедрение ИВО в моделирующую среду ПМБС НТИ «Маринет». В результате проведенных исследований на базе платформы имитационного моделирования ПМБС была получена оценка: снижения передаваемых усилий через лед с ИВО (по сравнению со сплошным льдом) в 3,23…3,65 раза, в зависимости от удаленности внешнего источника сил (судна); возможности движения судна через поле свободно плавающих ИВО (с целью проверки механизма расталкивания и отсутствия попадания под винт движущегося судна); отсутствия выноса ИВО за пределы защищаемой зоны в зимнее время, приемлемое распределение ИВО в акватории при основных погодных воздействиях в средне годовой период их основной эксплуатации.

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 акваторий 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 показали 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 все сезонную перфорацию ледового покрова, и как следствие обеспечивает значительное снижение прочностных характеристик льда и, как следствие, снижение передаваемых через лед нагрузок, вызванных внешними источниками.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Альхименко А.И., Беляев Н.Д., Фомин Ю.Н.** Безопасность морских гидротехнических сооружений. Лань. Санкт-Петербург 2003. 288 с.
2. **Gudmestard O.T., Losert S., Alhimenko A.I., Shkhinek K.N.,Torum A., Jensen A**. Engineering aspects related to arctic offshore developments. СПб. Лань.
3. **Шаталина И.Н., Трегуб Г.А.** Ледовые проблемы строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений. ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» 2013. 452 с.
4. **Алейников С.М., Панюшкин А.В.** Борьба с обледенением гидротехнических сооружений. Энергоиздат, 1982. 98 с.
5. **Алейников С. М., Турчина, В. А.** Гидротехническое строительство в районах Крайнего Севера. Ленинград: ВНИИГ, 1975. 234 с.
6. **Пехович А.И.** Основы гидроледотермики. Л.: Энергоиздат, 1983. 199 с.
7. **СП 38.13330.2018.** Свод правил. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).
8. **Alhimenko A.I., Kazunin I.D., Nikolaevskiy M.U.** The method of ice field strength reduction in port Sabetta on Yamal peninsula // International conference on engineering sciences and technologies. 2015. P 281-286.
9. **Alhimenko A.I., Kazunin I.D., Nikolaevskiy M.U.** A Method of Ice Field Reduction in Port Sabetta Water Area // International Ocean and Polar engineering conference. 2015. P.1875—1878.
10. **С.В. Маценко, С.В. Шапошников, И.Д. Казунин, О.В. Бутурлимов, Рыбий, А.А. Поселеннов и др**. Разработка технологии создания средств подготовки персонала перспективных морских нефтегазовых платформ по отработке операций обеспеченна добычи углеводородов на арктическом шельфе. Пояснительная записка к техническому проекту, исполнители, выпуск № 40018. СКБВ.466957.101 ГО. Гос. Регистр №9411.1007400.09.089. С-Петербург. Трансзас. 2009. с.410.
11. **В.В. Рыбий, О.Я. Тимофеев, И.Д. Казунин и др.** Российская ледовая информационная система (ЛИС) — залог успешного освоения Арктики //Журнал Морской вестник — № 4. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 63-67

12. **СМП @sevmorput.** Грузооборот морских портов России за 1 квартал 2022г. [https://dzen.ru/a/YlzuGUH_GlbLPqdg]
13. **Григорьев Михаил Николаевич.** Доклад: Тренды развития судоходства на Севморпути в 2023 году и ожидания 2024 года // Научно-практический семинар «Анализ гидрометеорологических процессов в арктических морях и гидрометеорологическое обеспечение морских операций в Арктике в 2023 году». Санкт-Петербург ААНИИ 16.11.2023, С.1-15.
14. **M A Yakimenko**. Structures of Berthing Facilities Recommended for Erection in Severe Climatic Conditions of the Arctic (Review)// Published under licence by IOP Publishing Ltd, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Chapter 3, Volume 753.
15. **Погодин В.А., Коровкин В.С., Шхинек К.Н., Фомин Ю.Н., Лисовский И.В., Альхименко А.И.** Гидротехнические сооружения морских портов. СПб.: Лан. 2014. 440 с.
16. **Козлов Д.В.** Развитие теории и методов гидравлических, ледотехнических и гидротермических расчетов водоемов и водотоков с ледяным покровом. Москва: 2002, 361 с.
17. **Добродеев А.А., Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е.** Методика экспериментального определения ледовой нагрузки на сооружение при реализации сценария предельной кинетической энергии // Морские интеллектуальные технологии. № 3. Ч. 3. 2023. С. 58-64
18. **Добродеев А.А., Сазонов К.Е.** Опыт исследования взаимодействия льда с гидротехническими сооружениями в ледовом бассейне // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 95-107.
19. **Афонюшкин М.С., Кантаржи И.Г.** Совместное воздействие волн и льда на сооружение при разрушении льда // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2025. Т. 315. С. 3-14.
20. **Богородский В.В., Гаврило В.П., Недошивин О.А.** Разрушение льда. Методы, технические средства. Ленинград. Гидрометеоиздат. 1983. 232 с.

21. **Жеребятьев В.П., Коваленко А.М., Козин В.М., Новолодский И.Д**. Способ разрушения ледяного покрова: патент на изобретение №1605471 от 29 мая 1989г.
22. **Козин В.М.** Способ разрушения ледяного покрова: патент на изобретение №2143373 от 23 февраля 1999г.
23. **Козин В.М.** Способ разрушения ледяного покрова: патент на изобретение №2194117 от 6 июня 2000г.
24. **Hulgard E., Serensen T., Hostrup-Schultz**. Ice cover prevention by means of air bubbles // Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Nassaq, Greenland. 1971 pp 1355-1366.
25. **Федотова О. А.** Использование тепла глубинных вод для обогрева причалов с помощью насосных установок // Труды научно-технической конференции молодых научных сотрудников СПГУВК. - СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2006. - с. 75-79.
26. **Аброськин К.И., Акатьев В.А., Акатьев С.В., Овсяник А.И., Седых Н.И., Соболев Г.П.** Способ ослабления ледового монолита рек и устройство для его реализации: патент на изобретение №2577589 от 17 декабря 2012г.
27. **Carstens, T.** Maintaining an Ice-Free Harbour by Pumping of Warm Water the Heat budget // Proceedings of the Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions Conference. 1977. V. 1.
28. **Huachen Pan, Esa Eranti.** Flow and heat transfer simulations for the design of the Helsinki Vuosaari harbour ice control system//Journal Elsevier, 2009. P. 304 310
29. **Киселёв Ю.М.** Способ разрушения морского льда и устройство для его осуществления: патент на изобретение №2465399 от 1 июля 2010г.
30. **Козин В.М.** Способ разрушения ледяного покрова: патент на изобретение №2249075 от 18 марта 2004г.
31. **Козин В.М.** Способ разрушения ледяного покрова: патент на изобретение №2124178 от 24 января 1997г.
32. **Чернявец В.В.** Способ разупрочнения ледяного покрова: патент на изобретение №2594115 от 2 апреля 2015г.

33. **Герасимов А.И., Семенов Х.Н., Попов С.Н.** Способ разупрочнения ледяного покрова: патент на изобретение №2533025 от 27 июня 2013г.
34. **Пуляевский А.М., Александрова Л.Н., Круглий О.А., Пуляевский А.А.** Способ снижения ледового давления на гидротехнические сооружения: патент на изобретение №2301863 от 6 июня 2005г.
35. **Козин В.М.** Способ разрушения ледяного покрова: патент на изобретение №2197406 от 5 июня 2001г.
36. **ГОСТ Р 15.011–96**. Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования.
37. **Трохимчук М.В., Азаров Д.В.** Устройство для защиты морского нефтегазового объекта от дрейфующего льда: патент на изобретение №94993 от 10 декабря 2009г.
38. **Каган Я.М., Межлумов М.О., Межлумов А.О., Сафиуллин М.Н., Шевалдин Г.Е.** Устройство защиты сооружений от движущихся ледяных полей: патент на изобретение №1047776 от 23 декабря 1977г.
39. **Антонов В.С., Горшков И.А., Миловский М.И., Ващило Д.Л.** Устройство противоледовой защиты для гидротехнического сооружения, расположенного на мелководном континентальном шельфе: патент на изобретение №2521674 от 24 января 2013г.
40. **Жак Э.Л., Франсиско М.С.** Ледорез для морских платформ и морская платформа: патент на изобретение №1162374 от 13 ноября 1981г.
41. **Александров А.В., Платонов В.В., Матанцев Р.А.** Устройство для защиты опор стационарных морских инженерных сооружений от внешнего ледового воздействия: патент на изобретение №2572344 от 21 мая 2014г.
42. **Васильев А.А., Маслова Н.П., Шамрай Ф.А.** Устройство для защиты опор морских инженерных сооружений: патент на изобретение №2431016 от 22 апреля 2010г.
43. **Гордеев И.И., Похабов В.И., Катенин В.А., Чернявец В.В., Аносов В.С., Жильцов Н.Н.** Устройство для защиты буровых объектов от разрушения при

движении ледяных полей: патент на изобретение №2493322 от 16 февраля 2012г.

44. **В.В. Тарасова, П.С. Иушина** «Примеры активной ледовой защиты морских нефтегазовых сооружений и новые разработки с использованием мягких надувных оболочек для разрушения льда» // Научные труды Дальрыбвтуза, 2013, Том: 28, С.55-69.
45. **Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М.** Механика разрушения и проблемы освоения Арктики // Арктика: экология и экономика 2015, № 4 (20), С. 20—24.
46. **Грамузова Е.М**. Разработка теории и создание практических методов расчета ледовой ходкости, выбора ф0рмб1 корпуса и основных элементов речного ледокола, ориентированных на условия его эксплуатации. Нижний Новгород 2006. 341 с.
47. **Белеитьев Л В., Головко В.И., Соколов А.Н., Казунин Д.В., Новиков С.И., Поселсннов А.А., Бутурлимов О.В., Хвастунов Л И , Рыбий В.В., Маценко С.В., Лобанов П.Г., Казунин И.Д., Смирнов Р.И, Малюгин АЛ**. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011612011: Тренажер морской нефтедобывающей платформы (Добыча 2011). Зарегистрировано 5 марта 2011г. (Авторское участие 10%: принимал участие в расчете прочностных характеристик, составлении математической модели теплового баланса).
48. **Шарапов Д.А., Шхинек К.Н.** Нагрузки от льда на вмёрзшие вертикальные стальные сооружения при горизонтальных подвижках ледового покрова. Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2016. Т. 282. С 99-107.
49. **Цуприк М.С.** Методология определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на морские сооружения на основе энергетического подхода. Владивосток. 2022. 393 с.
50. **Burton R., Yulmetov R., Taylor R.** Estimating level sea ice loads on sloping structures using machine learning-derived flexural strength. Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. 2023.

51. **Каштелян В.И. А.Я. Рывлин О.В. Фаддеев В.Я. Ягодкин** Ледоколы. Ленинград. Мудостроение. 1972. 288 с.
52. **Семенов Д.А.** Прогнозирование параметров взаимодействия битого и сплошного льда с судами и инженерными сооружениями на основе моделирования в пресноводном опытовом бассейне. Нижний Новгород 2015. 153 с.
53. **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 72-84.
54. **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 85-93.
55. **Ковалев С.М., Лебедев Г.А., Недошивин О.А., Сухоруков К.К.** Механические свойства морского льда. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 76 с.
56. **Богородский В.В., Гаврило В.П.** Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. СПб.: Гидрометеоиздат, 1980. 383 с.
57. **Степанюк И.А.** Технологии испытания и моделирования морского льда. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 78 с.
58. **Сазонов К.Е., Добродеев А.А.** Исследование прочности льда на изгиб в северо-восточной части Каспийского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 3 (101). С. 62–68.
59. **Скопинский В.Н., Захаров А.А.** Сопротивление материалов. М. МГИУ, 1999. 256 с.
60. **IAHR** – Recommendations on Testing Methods of Ice Properties. Second Report from IAHR – Working Group on Standardizing Testing Methods in Ice / ed. Schwarz Joachim // Bulletin Series A. Research Report.. Sweden. University of Luleå, 1979. Vol. 24. P. 26.
61. **Афанасьев, В. В**. Теория вероятностей. М.: ВЛАДОС, 2007. 350 с.

62. **Наследов, А. Д.** Профессиональный статистический анализ данных. СПб.: Питер, 2011. 400 с.

63. **Казунин И.Д., Хашба В.Н.** Численное моделирование прочности чистого льда и льда с искусственно вмороженными объектами, для определения наиболее эффективного варианта по снижению нагрузки на гидротехнические сооружения (статья для публикации) // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2025. Т. 317.

64. **Белеитьев А.В., Головко В.И., Соколов А.Н., Казунин Д.В., Новиков СИ., Поселснпов А.А., Бутурлимов О.В., Хвастунов А.П., Рыбий В.В., Маценко С.В., Лобанов П.Г., Казунин И.Д., Смирнов Р.И. Малюгин А.Л.** Патент на полезную модель №104359. Тренажер морских нефтедобывающих платформ. Зарегистрировано 10 мая 2011г. (Авторское участие 10%: принимал участие в расчете прочностных характеристик, составлении математической модели теплового баланса).

65. **НД № 2-020201-019.** Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ.

66. **Абрамовица М., Стиган И**. Справочник по специальным функциям. Москва: Наука, 1979. 832 с.

67. **Богородский П.В., Пнюшков А.В.** Простая модель кристаллизации морской воды в спектре температур. СПб.: Океанология, том 47, №4, 2007. 539-545 с.

68. **Назинцев Ю.Л., Панов В.В.** Фазовый состав и теплофизические характеристики морского льда. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 2000, 84 с.

69. **Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е.** Морской лед. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1975, 320 с.

70. **Schwertfeger P.** The thermal properties of sea ice // “J. Glaciol.”. 1963, vol. 4, N 36, P. 789-807.

71. **Назинцев Ю. Л.** Некоторые данные к расчету тепловых свойств морского льда // «Труды ААНИИ», 1964, т. 267, С. 31-47.

72. **Паундер Э.** Физика льда. Москва: Мир, 1967, 189 с.

73. **Weeks W.F., AssurA.** The Mechanical Properties of Sea Ice // Proc. Conf. on the Ice Pressure Against Structures. Techn. Memor. 1986, No 92, Laval Univ., Quebec, Canada. P. 25-78.

74. **Берденников В.П.** Изучение модуля упругости льда // Труды ГГИ.1948. Вып. 7 (61). С.13-23.

75. **Hutter K.** On the mechanical of floating ice sheet. Zurich. 1978. 103 p.

76. **Frederking R., Gold L. W.** The bearing capacity of ice covers under static loads // Canad. journ. of civil enj. - 1976. Vol.3(2). P. 258-293.

77. **Крицкий СН., Менкель М.Ф., Российский К.И.** Зимний термический режим водохранилищ, рек и каналов. М. Л: Госэнергоиздат, 154 с.

78. **И.Ю. Смолин, М.О. Еремин, П.В. Макаров,С.П. Буякова, С.Н. Кульков, Е.П. Евтушенко.** Численное моделирование механического поведения модельных хрупких пористых материалов на мезоуровне // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013. № 5(25). С. 78 – 89.

79. **Пехович А.И., Жидких В.М.** Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергоиздат, 1976. 342 с.

80. **Михеев М. А., Михеева И. М.** Основы теплопередачи. М.: Энергия. 1977. С. 347.

81. **Høyland K., Hornnes V., Salganik E., Samardzija I.** Ice thickness estimates for design of structures // Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Glasgow, United Kingdom. 2023.

82. **Петров И.Б.** Проблемы моделирования природных и антропогенных процессов в Арктической зоне Российской Федерации // Математическое моделирование. Т. 30. № 7. 2018. С. 103-136.

83. **Bekker A.T., Tatiana U.E., Pomnikov E.E.** Numerical simulation model of ice-structure interaction // Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Trondheim, Norway. 2015.

84. **Сладкова Л.А., Кузнецов А.В**. Моделирование процессов разрушения льда. Автомобиль, дорога, инфраструктура, №2(16), 2018г.

85. **Лосет С., Шхинек К.Н., Гудместад О., Хойланд К**. Воздействие льда на морские и береговые сооружения. Учебное пособие, Санкт-Петербург, 2010г, 272с.

86. **Гриневич Д.В., Нужный Г.А., Бузник В.М., Яковлев Н.О., Гончарова Г.Ю., Разомасов Н.Д**. Разрушение армированных ледовых композиционных материалов при изгибном механическом нагружении // Материаловедение. 2020. №1. С. 18–24.

87. **Kerr A.D.** The Bearing capacity of floating ice plates subjected to static or quasi-static loads. Journal of Glaciology, Vol.17, No.76, 1976

88. **Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С.** Пластинки и оболочки. Москва. Наука. 1966. С. 636.

89. **Timonshenko S.P.** Strength of Materials, Part 1 and Part 2; Krieger Pub. Co.: Malabar, FL, USA, 1940.

90. **Hendrikse, H.**; Nord, T.S. Dynamic response of an offshore structure interacting with an ice floe failing in crushing // Mar. Struct. 2019, 65, P. 271–290.

91. **Li L., Gao Q., Bekker A., Dai H.** Formulation of Ice Resistance in Level Ice Using Double-Plates Superposition. J. Mar. Sci. Eng. 2020, 8, 870; doi:10.3390/jmse8110870.

92. **Lubbad R., Løset S.** A numerical model for real-time simulation of ship–ice interaction // Cold Regions Science and Technology 65 (2011) 111–127.

93. **Сазонов К.Е., Симакина А.А., Тимофеев О.Я**. Изгиб ледяного поля под действием момента // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 4. С. 501–514.

94. **СП 444.1326000.** Нормы проектирования морских каналов, фарватеров и зон маневрирования

95. **НД 2-020101-072**. Правила классификации и постройки морских судов. Том 1.

96. **РД 31.31.21-81**. Основные положения по проектированию морских портов с замерзающей акваторией.

97. **Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Смирнов Р.И., Малюгин А.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011616397: RTM “Технологическая платформа** (RTM ТП). Зарегистрировано 17 августа 2011г.

98. **Белеитьев А.В., Головко В.И., Соколов А.Н., Казунин Д.В., Новиков С.И., Поселснnов А.А., Бутурлимов О.В., Хвастунов Д.П., Рыбий В.В., Маценко С.В., Лобанов П.Г., Казуннн И.Д. . Смирнов Р.И., Малюгин А.А.** Патент на изобретение №2467395: Способ создания изображений трехмерных объектов для систем реального времени. Зарегистрировано 20 ноября 2012г.

99. **Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Смирнов Р.И., Малюгин А.А., Костыгова Д.М., Улмнин Е.Д:** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №201266076: RTM объекта «Подводный добычной комплекс». Зарегистрировано 28 ноября 2012 г.

100. **Соколов А.Н., Казуннн Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Смирнов Р.И., Малюгин А.А., Костыгова Д.М., Ульшин Е.Д.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012660766: RTM объекта «Подводный трубопровод». Зарегистрировано 28 ноября 2012г.

101. **Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Рыбий В.В., Казунин ИД., Малюгин А.А., Шаров И.С.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013614766: Программный комплекс тренажера «Подводный добычной комплекс газоконденсатного месторождения». Зарегистрировано 21 мая 2013г.

Приложение 1. Акты внедрения

STEOR
НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ БУДУЩЕГО

ООО «СТЕОР – НСБ»
Россия, 199178, Санкт-Петербург,
Малый проспект В.О., д. 54, корп. 5, лит. П
info@steor.tech

Т.: +7 (812) 449-90-90
Ф.: +7 (812) 440-90-91
ОКПО 42742980
ОГРН 1197847248389
ИНН 7801676153 / КПП 780101001

Акт о внедрении

Результатов диссертационной работы Казунина Ивана Дмитриевича в платформу безэкипажного судовождения (ПМБС) Общества с ограниченной ответственностью “Стеор - Навигационные Системы Будущего”.
от 09 сентября 2024 г.

Актом подтверждается внедрение в ПМБС результатов диссертационной работы Казунина Ивана Дмитриевича, а именно:

1. Математической модели отдельных, плавающих по поверхности воды, симметричных объемных элементов, построенных на базе динамики твердого тела с шестью степенями свободы, которые могут использоваться для описания поведения свободно дрейфующих объектов (как частный случай - шарообразных ИВО) и разряженного битого льда.
2. Методики имитационной защиты акватории порта с использованием шарообразных ИВО с целью проведения экспертизы о возможности использования морских надводных автономных судов (БЭС) в условиях наличия препятствующих их движению объектов на поверхности акватории порта.
3. Методики имитационного моделирования движения поля шарообразных ИВО с целью проведения экспертизы по дрейфу поля, состоящего из этих объектов.
4. Методики имитационного моделирования выноса шарообразных ИВО из поля при прохождении через него судов в разных направлениях.

В.И.О. генерального директора
ООО “Стеор - НСБ” _____ Родионов А.Г.

М.П.

WWW.STEOR.TECH

Национальная технологическая инициатива
Маринет Национальная технологическая инициатива
Сколково

АО «КТ-Индустрия»
Малый пр-т В. О., д. 54, корп. 5, лит. П
Санкт-Петербург,
Россия, 199178

тел: +7 (812) 449 90 90
факс: +7 (812) 449 90 91
industry@kronshtadt.ru
www.kronshtadt.ru

Утверждаю
Генеральный директор
АО «КТ-Индустрия»

_____ Васильев А.А.
м.п.

АКТ

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Казунина Ивана Дмитриевича внедрены с 2011 по 2016 г. в Опытно-конструкторские работы (ОКР), выполненные компаний АО «КТ-Индустрия» (АО «КТ-Индустрия» 10 июля 2015 года переименовано из ЗАО «Транзас Индустриальные Технологии»; ЗАО «Транзас Индустриальные Технологии» 05 февраля 2014 года было переименовано из ЗАО «Транзас Морские Технологии») среди которых:

1. ОКР«Добыча»: разработка технологии создания средств подготовки персонала перспективных морских нефтегазовых платформ по отработке операций обеспечения добычи углеводородов на арктическом шельфе (с объемом государственного финансирования 115 млн. руб) в рамках ФЦП РГМТ 2009-2016. Внедрение произведено в части обработки информации и моделирования объектов континентального шельфа.
2. НИОКР с Минобрнауки России по теме: Разработка программного комплекса для проведения расчетов однофазных и трехфазных многокомпонентных потоков для статических и динамических режимов, связанных с добычей и транспортировкой углеводородного сырья на арктическом континентальном шельфе (импортозамещение наукоемких технологий) (с объемом государственного финансирования 175 млн. руб), выполняемого в рамках постановления правительства № 218. Внедрение произведено в части обработки информации и моделирования объектов континентального шельфа.
3. ОКР «Лёд-платформа»: Разработка опытного образца комплексной системы управления ледовой обстановкой (в части ЧТЗ с объемом государственного финансирования 56 млн. руб) в рамках ФЦП РГМТ 2009-2016. Внедрение произведено в части постановки задачи, проведения испытаний и обработки экспериментальных данных по изолирующему покрытию замерзающей акватории портов и объектов континентального шельфа с помощью плавучих масштабных шарообразных конструкций.

Технический директор Киркоров А.О.
Начальник проектного отдела Артамонов Г.М.
Ведущий инженер-программист Хвастунов А.П.

Приложение 2 Обоснование возможности использования безразмерного коэффициента адгезии k_{Ad} в исследовательских работах

Согласно [1] известно несколько теорий адгезии, при этом согласно мнению авторов [1] каждая из них была разработана для объяснения конкретных результатов физико-химических экспериментов по измерению адгезионной прочности соединения «адгезив-субстрат» на макрообразцах и изучению влияния различных факторов. Авторами [1] на стр.11-15 выделены основные теории Адгезии:

1. Адсорбционная теория адгезии (или молекулярная), которая разработана Дебройном и Мак-Лареном и определяет адгезию как результат взаимодействия между адгезивом и субстратом за счет межмолекулярных сил, т.е. как физическую адсорбцию.

2. Химическая теория адгезии представляется, как результат химического взаимодействия компонентов адгезионного соединения, которые реализующейся за счет образования химических связей между адгезивом и субстратом.

3. Электрическая теория адгезии предложена Дерягиным и Кротовой, реализуется путем контактной электризации, имеющей место при тесном соприкосновении адгезива и субстрата. Адгезив и субстрат в адгезионном соединении отождествляются с обкладками электрического конденсатора, а процесс разъединения адгезива и субстрата – с раздвижением обкладок конденсатора.

4. Диффузионная теория адгезии, предложенная для объяснения адгезии полимеров, разработана Воюцким, согласно которой адгезия обеспечивается посредством диффузии макромолекул или их сегментов через границу раздела «адгезив-субстрат» и образованием прочной связи между полимерами

5. Теория слабых граничных слоев разработана Бикерманом, и сводится к тому, что в зоне контакта адгезива и субстрата образуются «слабые» граничные слои с физико-химическими свойствами, отличными от свойств адгезива и субстрата, которые и определяют прочность адгезионного соединения.

6. Релаксационная теория адгезии (сцепления) рассматривает процессы деформации, возникновение внутренних напряжений и их релаксацию в адгезиве при отделении адгезива от поверхности субстрата.

7. **Механическая (микрореологическая) теория адгезии,** разработана Мак-Бен, *(и наиболее близко подходит к проблематике нашей задачи)*. Согласно этой теории, адгезия осуществляется за счет затекания адгезива в поры или трещины на поверхности субстрата с последующим затвердеванием. При этом считается, что между адгезивом и субстратом образуются «заклепки», связывающие компоненты адгезионного соединения путем механического заклинивания. Таким образом, прочность адгезионного соединения определяется пористостью субстрата (включая форму пор) и прочностью пленки адгезива.

Большинство из изложенных выше теорий адгезии [1] описывают явление адгезии как четкое разграничение двух процессов – формирования адгезионного соединения и его разрушения. Данные вопросы часто обсуждаются с автором, но выходят за рамки диссертационного исследования по тематике снижения передаваемого ледового усилия на ГТС. Именно поэтому, чтобы не уводить исследование “за рамки предметной области гидротехники”, автором принято решение при определении *безразмерного коэффициента адгезии* k_{Ad} *в главе 2*, применить подход, изложенный в работе [2] «по безразмерному коэффициенту адгезии», для которого автором были введены логические ограничения диапазона k_{Ad} от 0 до 1 в исследовании. Значение безразмерного коэффициента адгезии k_{Ad} стремится к нулю в случае, если вода не проникала в поры ИВО и замерзала, образуя гладкую перфорацию в фрагменте льда в местах соприкосновения с ИВО, а $k_{Ad} = 1$, согласно механической теории адгезии возникает, если вода замерзала, проникнув в поры ИВО и при застывании, образуя прочные механически связи (заклепки).

1. Ю.Г. Богданова Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов, Учебное пособие для студентов по специальности «Композиционные наноматериалы», МГУ, М. 2010, 68 с.

2. В.В. Зелинский, Е.А. Борисова О МЕХАНИЗМЕ СНИЖЕНИЯ ИЗНОСА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ// ВестникПНИПУ, Машиностроение 2014, материаловедение Т. 16, № 2, С.51-57

Приложение 3. Описание моделирующей среды

Для внедрения в моделирующую среду ПМБС дрейфующего, сферического ИВО на базе имеющейся в ПМБС модели движения судна (совместно с сотрудником ООО Стеор А.Малюгиным) была создана модель ИВО с учетом ранее выполненных наработок автора [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13] и с учетом основных принятых допущений:

1. математическая модель ИВО базируется на уравнениях движения ПМБС для твердого тела с 6-ю степенями свободы (по трем координатам и трем углам поворота), которые включают основные силы, действующие на ИВО: гидродинамические, аэродинамические и волнового воздействия, а также силы контакта с ИВО на основе “контакта предварительно заданных ~~для них~~ оболочек”. ИВО описаны с помощью широко известной модели твердого тела с шестью степенями свободы, используемой при описании движения судов, для которой автором принято два допущения:

- для описания движения вращающегося, шарообразного ИВО в плоскости его ватерлинии единственным образом выбирается “направление его основного движения”, которое для ИВО становится расчетным аналогом “носа”.

- силовое взаимодействие ИВО между собой и с ГТС ~~упрощенно описано физикой~~ - расчет контакта на базе ~~стандартного графического пакета Unity 3D с использованием~~ расчётной библиотеки Bullet Physics, для визализации используется графический пакет Unity 3D.

2. модель поля ИВО реализована “как система дискретных элементов” и позволяет моделировать движение системы большого числа (порядка 15 000 тысяч) ИВО или других плавучих объектов разной природы (битый лед, мусор, технологические объекты и т.д.).

В работе представлено краткое описание математической модели ИВО, которое включает уравнения движения и основные силы: уравнения динамики, силы, действующие на ИВО (гидродинамические и аэродинамические) и модели ветрового и волнового воздействия, а также модуль расчета контактов между ИВО на основе заданных оболочек.

Чтобы применить для ИВО широко известную модель твердого тела с шестью степенями свободы, используемую для описания движения судов, автором принято и представлено ниже два решения:

1. Для описания движения вращающегося, шарообразного ИВО в плоскости его ватерлинии единственным образом выбирается направление “направление его основного движения”, которое для ИВО становится расчетным аналогом диаметральной плоскости судна в широко применяемой теории для описания движения судна.

2. Силовое взаимодействие ИВО между собой и льдом упрощенно описано физикой контакта на базе ~~стандартного графического пакета Unity 3D с использованием~~ расчётной библиотеки Bullet Physics по приведенному в последнем разделе алгоритму.

Для описания движения ИВО используются следующие системы координат (все системы координат являются ортогональными):

- $O_0X_0Y_0Z_0$ – неподвижная относительно Земли (**глобальная) система координат** с центром O_0 в определенной неподвижной точке:

Ось X_0 направлена на север и лежит в плоскости, параллельной невозмущенной поверхности воды,

Ось Y_0 направлена вверх под прямым углом к невозмущенной поверхности воды.

Ось Z_0 направлена на восток и лежит в плоскости, параллельной невозмущенной поверхности воды.

- $GXYZ$ – жестко связанная с ИВО (**локальная) система координат** с центром в центре тяжести ИВО (G):

Ось GX направлена с кормы в нос, лежит в диаметральной плоскости (ДП) и параллельна плоскости ватерлинии (продольная ось);

Ось GY направлена сверху вниз под прямым углом к плоскости ватерлинии (перпендикулярная ось).

Ось GZ направлена к правому борту, перпендикулярна диаметральной плоскости и параллельна плоскости ватерлинии (поперечная ось);

Ориентацию ИВО в пространстве задается единичным кватернионом q (кватернионом вращения), который используется в моделирующей платформе вместо широко распространенных в кинематике матриц вращения, что позволяет избежать вычислительных проблем (неоднозначности определения угла поворота).

Связь между радиус-вектором центра масс r_G и его линейной скоростью υ описывается кинематическим уравнением:

$$\frac{dr_G}{dt} = \upsilon \qquad \textbf{(1)}$$

Связь кватерниона q с угловой скоростью ИВО ω задается формулой:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \omega * q \qquad \textbf{(2)}$$

где * – операция произведения кватернионов.

Динамика ИВО как твердого тела в неподвижной системе координат описывается системой уравнений **(3)**:

$$\begin{cases} m_{ИВО} \cdot \dfrac{d\upsilon}{dt} = F_I + F_H + F_C + F_A + F_G + F_W + F_{contact} + F_{ext} \\ I_{ИВО} \cdot \dfrac{d\omega}{dt} + \vec{\omega} \times \left(\hat{I}_{ИВО} \cdot \vec{\omega} \right) = M_I + M_H + M_C + M_A + M_G + M_W + M_{contact} + M_{ext} \end{cases} \quad \textbf{(3)}$$

где $m_{ИВО}$ – масса ИВО, $I_{ИВО}$ - тензор инерции ИВО в осях неподвижной системы координат, F_I, M_I - инерционные силы и моменты, F_H, M_H - общие гидродинамические силы и моменты (включающие плавучесть, остойчивость, демпфирование, гидродинамические силы и моменты), F_C, M_C – силы и моменты от воздействия течения, F_A, M_A – аэродинамические силы и моменты, F_G, M_G – силы и моменты возникающие под действием силы тяжести, F_W, M_W – силы и моменты возникающие от волнового воздействия, $F_{contact}$, $M_{contact}$ - силы и моменты возникающие в результате контакта, F_{ext}, M_{ext} - внешние силы и моменты.

Присоединенные массы ИВО рассчитываются с учетом формы его оболочки (корпуса). В задаче моделирования пространственного движения ИВО для используемой Платформы Моделирования (ПМБС) перекрестные члены матрицы добавленных масс жидкости можно не учитывать, поскольку они относительно малы.

Путем интегрирования уравнений движения получаем компоненты скорости υ и угловой скорости ω. Путем интегрирования кинематических уравнений получаем координаты центра тяжести и кватернион вращения q в следующий момент времени. Из кватерниона q можно получить углы крена и курса ИВО.

Вышеуказанная система уравнений (1, 2, 3) описывает движение ИВО, имеющего шесть степеней свободы. Правая часть уравнений (3) раскладывается на силы и моменты разной природы. Они записываются также в глобальной системе координат.

Инерционные силы и моменты, принятые в нашей модели, связанны с эффектами «идеальной жидкости», и имеют следующий вид:

$$F_I = -\begin{pmatrix} k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 \\ 0 & 0 & k_{33} \end{pmatrix} \cdot m_{ИВО} \cdot \frac{d\upsilon}{dt} \; M_I = -\begin{pmatrix} k_{44} \cdot I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{55} \cdot I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{66} \cdot I_{zz} \end{pmatrix} \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

где обычно $0 < k_{ij} < 1$.

Общие гидродинамические силы и моменты раскладываются на компоненты:

$$F_H = F_{hydro} + F_{ST} + F_D$$
$$M_H = M_{hydro} + M_{ST} + M_D$$

где F_{hydro}, M_{hydro} – гидродинамические сила и момента (учитывающие вязкостное сопротивление и сопротивление на волнообразование), F_{ST}, M_{ST}– сила и момент остойчивости, F_D, M_D – демпфирующие сила и момент (вязкостной природы).
Сила и момент остойчивости F_{ST}, M_{ST} имеют вид:

Вертикальная составляющая силы F_{ST}

$$F_{ST\,y} = \rho_в \cdot g \cdot V_{n\ ИВО}$$

Моменты остойчивости M_{ST} *в* горизонтальных осях *x, z*

$$M_{ST\,z} = 0;\ M_{ST\,x} = 0$$

Сила и момент демпфирования F_D, M_D имеют вид:

$$F_{D\,y} = -C_{d\,y} \cdot m_{ИВО} \cdot \sqrt{\frac{g}{r_{ИВО}}} \cdot \upsilon_y \cdot \alpha_d$$

$$M_{D\,x} = -C_{dm\,x} \cdot I_{xx} \cdot \sqrt{\frac{g}{r_{ИВО}}} \cdot \omega_x \cdot \alpha_d$$

$$M_{D\,z} = -C_{dm\,z} \cdot I_{zz} \cdot \sqrt{\frac{g}{r_{ИВО}}} \cdot \omega_z \cdot \alpha_d$$

где демпфирующие коэффициенты $C_{d\,y}$ $C_{dm\,x}$ $C_{dm\,z}$ зависят от числа Фруда, $r_{ИВО}$ – радиус ИВО, коэффициент α_d определяется по формуле:

$$\alpha_d = \left(\frac{V_{n\,ИВО} \cdot \rho_в}{m_{ИВО}} \right)^{2/3}$$

где $V_{n\,ИВО}$ – объём погруженной части ИВО, $\rho_в$ – плотность воды.
Гидродинамические сила и момент F_{hydro}, M_{hydro} вычисляются по формулам:

$$F_{H\,x} = -0.5 \cdot C_{H\,x} \cdot \rho_в \cdot r_{ИВО}^2 \cdot \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_z^2} \cdot \upsilon_x$$

$$F_{H\,z} = -0.5 \cdot C_{H\,z} \cdot \rho_в \cdot r_{ИВО}^2 \cdot \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_z^2} \cdot \upsilon_z$$

$$M_{H\,y} = -0.5 \cdot C_{Hm\,y} \cdot \rho_в \cdot r_{ИВО}^3 \cdot \left|\omega_y\right| \cdot \omega_y$$

где $C_{H\ x}$ $C_{H\ z}$ $C_{Hm\ y}$ - гидродинамические коэффициенты, зависящие от угловой скорости.

Аэродинамические силы и моменты выражаются с помощью безразмерных аэродинамических характеристик следующим образом:

$$F_{Ax} = -0.5 \cdot C_{Ax} \cdot \rho_{вз} \cdot A_{н\,ИВО}(y_G) \cdot \sqrt{\upsilon_{Ax}^2 + \upsilon_{Az}^2} \cdot \upsilon_{Ax}$$

$$F_{Az} = -0.5 \cdot C_{Az} \cdot \rho_{вз} \cdot A_{н\,ИВО}(y_G) \cdot \sqrt{\upsilon_{Ax}^2 + \upsilon_{Az}^2} \cdot \upsilon_{Az}$$

$$M_{A\,y} = 0.5 \cdot C_{Am\,y} \cdot \rho_{вз} \cdot r_{ИВО} \cdot A_{н\,ИВО}(y_G) \cdot \left|\omega_y\right| \cdot \omega_y$$

где $A_{н\ ИВО}$ - площадь парусности (надводная часть ИВО), $C_{A\ x}$ $C_{A\ z}$ $C_{Am\ y}$ - безразмерные коэффициенты рассчитываются как функции угла кажущегося ветра с учетом конфигурации надводной части ИВО.

Волновые силы раскладываются на следующие компоненты:

$$F_W = F_{WP} + F_{WD}$$

$$M_W = M_{WP} + M_{WD}$$

где F_{WP} M_{WP} – периодические волновые силы и моменты, F_{WD} M_{WD} – силы и моменты волнового дрейфа.

Расчет периодических волновых сил и моментов:

Расчет сил волнового дрейфа производится через значительную высоту спектра волнения:

$$F_{wd\,x} = C_{wd\,x}\left(\chi, h_{вл\,1/3}\right)\cdot \rho_в \cdot g \cdot r_{ИВО} \cdot h^2_{вл\,1/3} \cdot \alpha_d$$

$$F_{wd\,z} = C_{wd\,z}\left(\chi, h_{1/3}\right)\cdot \rho_в \cdot g \cdot r_{ИВО} \cdot h^2_{вл\,1/3} \cdot \alpha_d$$

$$M_{wd\,y} = C_{wdm\,y}\left(\chi, h_{вл\,1/3}\right)\cdot \rho_в \cdot g \cdot r^2_{ИВО} \cdot h^2_{вл\,1/3} \cdot \alpha_d$$

где $h_{вл\ 1/3}$ - значительная высота волнения, χ – угол встречи с генеральным направлением волнения и выбранным курсом по направлению основного движения ИВО, $C_{wd\ x}$ $C_{wd\ z}$ $C_{wdm\ y}$ – редукционные коэффициенты волнового дрейфа.

Для расчета *взаимодействий и столкновений* ИВО между собой, с дном и статическими объектами используется подход динамики системы твердых тел со связями и контактами.

Для каждого ИВО записываются уравнения динамики твердых тел и определяем ограничения на перемещения, изменения скорости и ускорения ИВО.

На первом этапе происходит расчет точек контакта между всеми ИВО с учетом оболочек ИВО. Оболочка ИВО представляет из себя сферу.

На втором этапе рассчитываются силы $F_{contact}$, $M_{contact}$ в полученных на первом этапе точках с учетом ограничений, накладываемых на эти силы. Для этого используется итерационный алгоритм, один из вариантов – проекционный метод Гаусса-Зейделя.

Приложение 4. Экономическое сравнение

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Крыловский государственный научный центр»
(ФГУП «Крыловский государственный научный центр»)

Московское шоссе, 44, Санкт-Петербург, 196158
тел: +7(812)415-46-07 факс: +7(812)727-96-32
e-mail: krylov@ksrc.ru www.krylov-centre.ru
ИНН 7810213747 ОКПО 07535359 ОГРН 1027804905303

_____ № _____

На № _____ от _____

Согласно методике экономических расчетов, представленной в Приложении 1 к данному письму, срок окупаемости использования иррегулярно вмороженных объектов (далее – ИВО), предложенных в диссертационной работе Казунина И.Д. по снижению передаваемых нагрузок через лед на ГТС в акватории порта Саббета, составляет 9,8 лет по сравнению с использованием портового ледокола. Также использование предлагаемой технологии инженерной защиты, позволит снизить расходы на материалы при строительстве причальных стенок ГТС в 25-35%, в зависимости от класса сооружения.

Приложение: методика расчета экономических показателей использования ИВО на 1 л.

С уважением,
Начальник 2 отделения В.В. Магаровский

Федеральное государственное унитарное предприятие «Крыловский государственный научный центр» Для документов

Приложение 1

Методика расчета экономических показателей использования ИВО.

А) расчет стоимости использования технологии инженерной защиты ГТС

1. В качестве начальных капитальных затрат использована стоимость закупки материалов, изготовление элементов ИВО и установка на закрытом участке акватории порта, в пересчете по валютному курсу в цены 2025 и данные по в стоимости литьевого полиуретана, представленные компанией ООО «ХимАбразивЗащита».

2. В качестве транспортных расходов используется: стоимость доставки ИВО морем от места изготовления до порта Саббета по тарифам северного завоза применяемых в 2025 году.

3. Эксплуатационные расходы по защите акватории порта Саббета при толщине льда 1 м. включают: сезонное истирание и возврат вынесенных ИВО в зону защищаемой акватории буксиром по тарифам Росморпорта 2025.

Б) использование портового ледокола Обь для закрытой акватории порта Саббета для обеспечения круглогодичной навигации.

1. В качестве начальных капитальных затрат использована построечная стоимость (*) портового ледокола в пересчете по валютному курсу в цены 2025 года.

2. В качестве транспортных расходов используется: стоимость движения своим ходом ледокола от места строительства до порта Саббета по суточной ставке Росмопорта в 2025 году.

3. Эксплуатационные расходы по защите акватории порта Саббета при толщине льда 1 м. включают: затраты на использование портового ледокола Обь для ежедневной колки льда параллельными гласами, на расстоянии полной ширены корпуса ледокола по тарифам Росморпорта 2025 года.

(*) в методике не учитывается дотации государства строительства ледокольного флота.

(**) в методике не учитывается дотация государством части эксплуатационных расходов ледокольного флота

В) проектирование и строительство причальных стенок ГТС с учетом усиления несущих конструкций.

1. В качестве начальных капитальных затрат используется расходы на закупку материалов, аренда строительной техники, монтажные работы.

2. В качестве транспортных расходов используется: стоимость доставки материалов морем/сухопутным способом от места изготовления до порта Саббета по тарифам северного завоза применяемых в 2025 году.

3. Эксплуатационные расходы не учитывались.