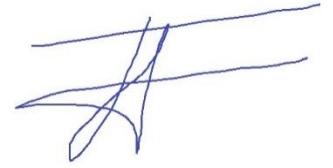


На правах рукописи



Политько Валентин Александрович

**Воздействие ледовых полей на одно- и многоопорные
гидротехнические сооружения с вертикальной опорной частью**

05.23.07 - Гидротехническое строительство

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кантаржи Исмаил Григорьевич

Официальные оппоненты: **Уварова Татьяна Эриковна**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Дальневосточный федеральный университет», кафедра
гидротехники, доцент

Соболь Илья Станиславович
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Нижегородский государственный архитектурно-
строительный университет», проректор по научной работе

Ведущая организация: **ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук» (ИВП РАН)**

Защита состоится «18» декабря 2018 г. в 14.00 часов (по местному времени) на заседании диссертационного совета Д 212.138.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 9 студия «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте www.mgsu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бестужева Александра Станиславовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационных исследований

Ледотехническим аспектам строительства гидротехнических сооружений в последнее время уделяется все больше внимания, ввиду растущего объема деятельности в северных широтах нашей страны. Одной из причин повышенного интереса к Крайнему Северу является его богатый ресурсный потенциал. Еще одним важным аспектом растущей деятельности в северных широтах является курс на модернизацию портовых сооружений Северного морского пути, связанный с ростом сообщения и объемов грузоперевозок между странами Европы, европейской частью России и азиатскими рынками. Большую часть года в акваториях Крайнего Севера присутствуют ледовые образования различных форм. Совершенствование методов прогнозирования ледовых условий и методик определения нагрузок от ледовых образований на суда и сооружения становится важным фактором обеспечения безопасности морских операций.

Степень разработанности темы исследований

В России ведутся исследовательские работы, направленные на совершенствование методик определения ледовых нагрузок. Большой исследовательский вклад по вопросам эффекта вибраций морских сооружений под воздействием ледовых полей, а также общим вопросам определения ледовых нагрузок был внесен К.Н. Шхинеком и его последователями. Специалистами из Дальневосточного Федерального Университета уделяется много внимания вопросам абразии материалов, подверженных прямому воздействию льда. Институт АНИИ проводит обширные кампании по сбору информации о ледовых условиях северных морей. Много ледовых исследований было проведено на базе МГСУ. К сожалению, большая часть результатов этих исследований до сих пор не нашла практического применения в отечественных строительных нормах. Несмотря на значительные продвижения в области изучения ледовых воздействий, совершенствование методик оценки ледовых нагрузок и воздействий остаётся актуальным.

Цель и задачи диссертационной работы

Вопросы корректной оценки ледового воздействия от дрейфующего ровного ледового поля на одно-, многоопорные и протяженные гидротехнические сооружения с вертикальной опорной частью определяли **цель диссертации**, которая заключалась в аналитическом и численном исследовании различных аспектов, определяющих ледовую нагрузку.

Для этого потребовалось решить следующие задачи:

1. Анализ научных статей, диссертаций, докладов, действующих нормативов в области определения ледовых нагрузок с целью получения информации о современном уровне знаний о механике льда и актуальных исследованиях в области ледотехники.

2. Сбор данных о результатах крупномасштабных полевых измерений ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения с целью дальнейшей верификации численных моделей и сравнения натуральных данных с расчетными нагрузками по СП 38.13330.2012.
3. Создание численной модели для исследования процесса взаимодействия ледового поля с вертикальными опорами гидротехнических сооружений при разрушении льда.
4. Выбор модели и критериев прочности льда при его взаимодействии с сооружением;
5. Проведение численных и аналитических исследований взаимодействия ровного ледового поля с одноопорными и многоопорными сооружениями.
6. Применение результатов исследования для оценки ледовой нагрузки от ровного дрейфующего ледяного поля на гидротехнические сооружения порта плавучей атомной теплоэлектростанции ПАТЭС в городе Певек.

Научная новизна исследований

1. Разработана методика численного моделирования взаимодействия ровного ледяного поля с сооружением с вертикальной опорной частью на основе комплекса ANSYS. Проведена верификация результатов моделирования по данным лабораторных и натуральных исследований и показана приемлемость разработанной численной модели для практического применения.
2. Проведено исследование масштабного эффекта ледовой нагрузки. Получено аналитическое решение для определения ледового воздействия на одноопорное сооружение при разрушении льда, учитывающее зависимость ледовой нагрузки от отношения ширины опоры к толщине льда b/h и от толщины льда h .
3. Проведен численный анализ влияния формы опоры на ледовую нагрузку. На основе численного анализа уточнены коэффициенты формы опоры m , применяемые в формулах стандарта СП 38.13330.2012.
4. Проведено численное исследование влияния зон высокой прочности в поле однолетнего льда на величину ледовой нагрузки. Получены данные о том, что зоны высокой прочности оказывают значительное влияние на величину ледовой нагрузки. Их прочностные характеристики должны лежать в основе определения расчетной ледовой нагрузки.
5. Проведен численный анализ влияния затора льда в межопорном пространстве многоопорного сооружения на ледовую нагрузку. На основе проведенного анализа представлены значения дополнительного коэффициента затора K_3 .
6. Проведен численный анализ основных факторов, определяющих ледовую нагрузку на многоопорное сооружение. Определено влияние основных трех факторов: расстояния между опорами, угла воздействия дрейфующего льда, толщины льда.

7. Проведена оценка изменчивости основных характеристик ледового поля на протяжении ледового периода на примере ГС проекта ПАТЭС в г. Певек. Представлен рациональный подход к определению расчетной ледовой нагрузки с учетом постепенного нарастания толщины льда и постепенного снижения прочности льда в весенне-летний период.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработана численная модель, которая может быть использована с целью моделирования процесса воздействия ровного ледового поля на гидротехнические сооружения с вертикальной опорной частью.
2. Разработано аналитическое решение для определения ледовой нагрузки от ровного поля при разрушении льда, которое учитывает зависимость масштабного эффекта ледовой нагрузки одновременно от отношения ширины опоры к толщине льда b/h и от толщины льда h .
3. При помощи аналитического решения было определено, при каких условиях расчеты по СП 39.13330.2012 дают завышенные или заниженные значения ледовых нагрузок.
4. На базе проведенного численного анализа влияния формы опоры на ледовую нагрузку предложено уточнение коэффициентов формы опоры m , применяемых в формулах стандарта СП 38.13330.2012.
5. Определено влияния зон повышенной прочности в поле однолетнего льда на величину ледовой нагрузки.
6. Проведена оценка влияния различных факторов на ледовую нагрузку на многоопорные сооружения.
7. На основе результатов численного анализа влияния затора льда в межопорном пространстве многоопорного сооружения на ледовую нагрузку было предложено введение дополнительного коэффициента затора K_3 в формулу СП 38.13330.2012 и получены его соответствующие значения.
8. Проведено сопоставление ледовой нагрузки на трехопорные и четырехопорные сооружения.
9. Проведен анализ изменчивости характеристик льда и ледовой нагрузки на протяжении ледового сезона на примере гидрометеорологических условий района г. Певек. Определен подход к сбору статистической информации о ледовых параметрах, а также представлен рациональный подход к определению расчетной ледовой нагрузки с учетом постепенного нарастания толщины льда и снижения прочности льда в весенне-летний период.

Методология и методы исследования. Для достижения поставленной цели были использованы аналитические решения и численное моделирование воздействия ледового поля на одно- и многоопорные сооружения на базе программного комплекса ANSYS.

Личный вклад автора заключался в постановке цели и формулировании задач диссертационного исследования, разработке модели для численного моделирования, постановке аналитического решения, проведении численных и аналитических исследований, формулировании заключения по диссертационной работе.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика численного моделирования процесса воздействия ровного ледового поля на сооружение с вертикальной опорной частью. Модель льда, определяющая напряженно-деформированное состояние льда под нагрузкой, и алгоритм численного моделирования льда.
2. Аналитическое решение для определения ледового воздействия на одноопорные и протяженные сооружения при разрушении льда.
3. Результаты анализа расчетных положений СП 38.13330.2012 в области определения ледовой нагрузки от ровного льда.
4. Результаты численного анализа влияния формы опоры на ледовую нагрузку.
5. Результаты численного анализа влияния различных факторов на суммарную ледовую нагрузку на многоопорное сооружение.
6. Подход к определению максимальной ледовой нагрузки от ровного льда с учетом изменчивости ледовых характеристик на протяжении ледового сезона и длинного ряда статистических ледовых данных.

Степень достоверности результатов исследований подтверждается согласием результатов расчетов и численного моделирования с данными лабораторных и натурных измерений ледовых воздействий на гидротехнические сооружения с вертикальной опорной частью.

Апробация работы

Основные результаты работы были доложены на: XVIII Международной межвузовской научно-практической конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – Формирование среды жизнедеятельности» (г. Москва: ФГБОУ ВПО НИУ МГСУ, 2015); XX Международной межвузовской научно-практической конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – Формирование среды жизнедеятельности» (г. Москва: ФГБОУ ВПО НИУ МГСУ, 2017); на международной научно-практической конференции «Обеспечение гидрометеорологической и экологической безопасности морской деятельности» (г. Астрахань, 2015).

Публикации

Материалы диссертационного исследования опубликованы в 9 научных работах, в том числе 5 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, приложений и списка литературы, содержащего 130 наименований. Текст работы изложен на 142 страницах. Диссертация содержит 77 рисунков и 31 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, показаны научная новизна и достоверность результатов, теоретическая и практическая значимость работы, а также представлены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен общий анализ ледовых полей, как фактора воздействия на гидротехнические сооружения. Представлена краткая характеристика ледовых условий северных арктических морей, информация о рисках нарушений работы шельфовых и береговых сооружений, подверженных ледовым воздействиям, с фактическими данными о локальных разрушениях конструкций, вибрациях, опрокидывании и смещении конструкций маяков, и др.

На основании анализа различных исследований и ледовых изысканий, проведенных, в первую очередь, в Охотском море, а также в морях Северного Ледовитого Океана (СЛО), представлены численные значения ключевых ледовых параметров. Также дана краткая характеристика основных факторов, определяющих нагрузку от ледового поля на ГС.

Во **второй главе** был проведен анализ методики определения нагрузки от ледового поля на вертикальные сооружения в соответствии с СП 38.13330.2010 на фоне известных данных масштабных измерений ледовых нагрузок, международного стандарта ISO 19906 и данных исследований, опубликованных за последние годы.

В главе отдельным пунктом представлены известные данные масштабных натуральных измерений ледовой нагрузки, в первую очередь, собранные на платформе Моликпак в период 1984-1989 гг., а также на маяках в Балтийском море.

Анализ показал, что фундаментальных отличий между СП 38.13330.2012 и ISO 19906 нет. Расчетные формулы во всех стандартах используют прочностные характеристики льда и учитывают масштабный эффект ледового воздействия, правильное определение которого является важным с точки зрения корректности определения ледовых нагрузок.

Результатом анализа стал вывод о том, что с целью усовершенствования методики определения ледовой нагрузки целесообразно, в первую очередь:

- уточнить базовые расчетные положения с целью гармонизации российских строительных норм с ведущими зарубежными нормами;
- на базе имеющих многочисленных данных натуральных и лабораторных испытаний уточнить учет масштабного эффекта ледовой нагрузки в расчетных формулах;

- уточнить расчетные положения по определению ледовых нагрузок на многоопорные сооружения, в том числе с учетом затора ледяной массы между опорами.

В **третьей главе** представлена численная модель для моделирования воздействия ровного ледового поля на гидротехническое сооружение с вертикальной опорной частью. Численная модель была разработана в программе ANSYS, верифицирована на базе двух экспериментальных работ и использована в рамках диссертационного исследования с целью изучения силового воздействия ледового поля на гидротехнические сооружения.

В начале главы дан общий обзор возможности моделирования ледовых воздействий при помощи МКЭ с выводом о том, что численное моделирование ледовых воздействий на гидротехнические сооружения возможно при условии, что определены два основных фактора:

- 1) Определена модель материала (льда), характеризующая его напряженно-деформированное состояние при заданных нагрузках, и заданы критерии его разрушения;
- 2) Определен алгоритм численного моделирования льда.

Для численной модели были определены следующие ключевые положения:

- был выбран подход к моделированию ровного ледового поля как твердого сплошного тела;
- процесс разрушения льда был задан при помощи Модели Удаления Элементов;
- в качестве критерия прочности для льда была принята теория Мора-Кулона.

Численная модель была верифицирована на основе двух экспериментальных работ:

1. Внедрение прямоугольного горизонтального штампа в ледовое поле (натурные испытания в Охотском море, 1998);
2. Лабораторные модельные испытания взаимодействия ледового поля с четырех-опорной конструкцией в бассейне Крыловского научного центра, 2011.

В рамках сравнения результатов численного моделирования с первым натурным экспериментом по внедрению горизонтального штампа в ровный лед была проведена оценка изменения ледовой нагрузки во времени. В ходе полевого испытания и численного моделирования был отмечен одинаковый пик нагрузки при первоначальном контакте, равный 150 кН. Далее после взлома кромки льда нагрузка упала до 30 кН. При дальнейшем внедрении штампа в лед был отмечен циклический характер нагрузки. Повышение нагрузки по численной модели было до 40-130 кН, по результатам натурных измерений до 30-90 кН (рисунок 1).

Также была проведена оценка характера воздействия льда на установку. Численная модель показала схожие результаты с натурным экспериментом: при первоначальном контакте была загружена вся центральная часть измерительной панели, при дальнейшем внедрении штампа в лед площадь зон высокого давления не превышала 10% от общей площади измерительной панели (рисунок 2).

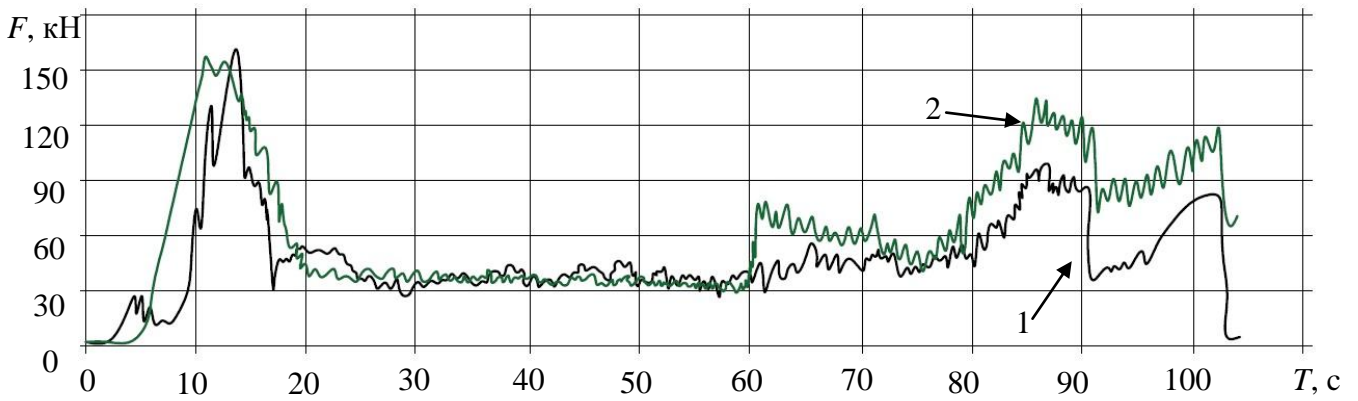


Рисунок 1 - График колебаний нагрузки от ледового поля на экспериментальную установку (штамп): 1 – в ходе полевых испытаний; 2 – в ходе численного моделирования

Второе сравнение численной модели было проведено с результатами прорезания льда физической моделью четырехпорной конструкции в бассейне Крыловского научного центра. Как было продемонстрировано на рисунке 3 характер разрушения льда по численной модели и по натурному эксперименту был схожим.

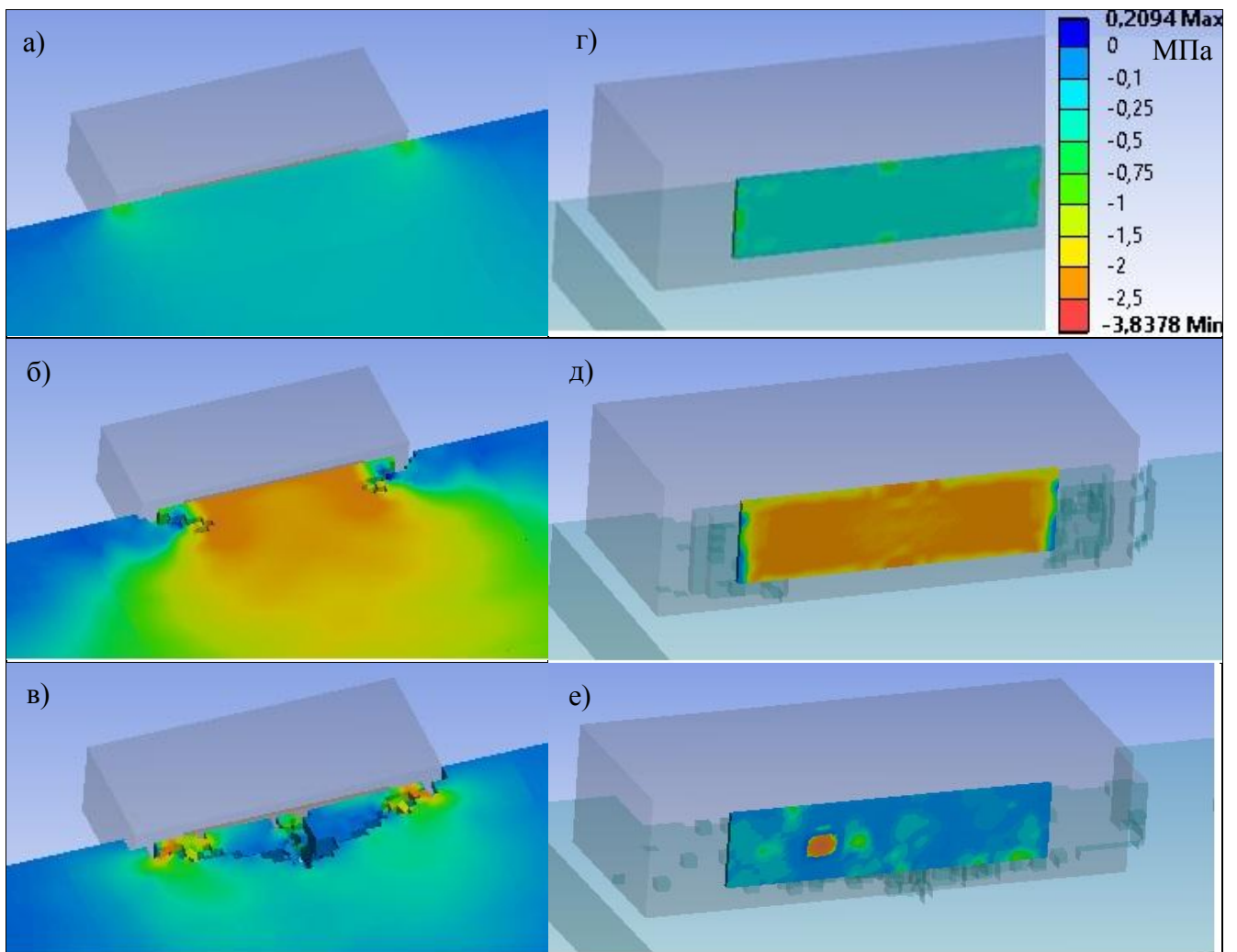


Рисунок 2 - Графическое представление результатов численного моделирования в виде полей главных нормальных напряжений: а) б) в) ледового поля; г) д) е) измерительной панели.

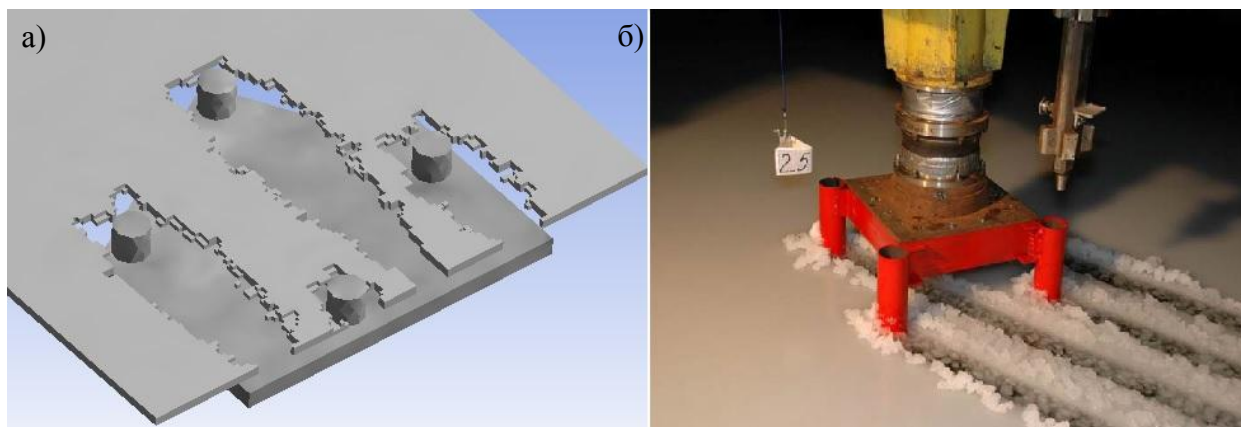


Рисунок 3 - Картина разрушения льда при воздействии на четырех опорное сооружение под углом $\alpha = 30^\circ$: а) при численном моделировании; б) в ходе модельных испытаний

Коэффициенты взаимовлияния опор (таблица 1), определенные по результатам численного моделирования, были незначительно ниже (не более чем на 5%) чем те, что получились по результатам эксперимента в бассейне при скорости 0.05 м/с, когда наблюдалось хрупкое разрушение льда.

Таблица 1 - Общий коэффициент взаимовлияния опор четырех опорной конструкции при разных углах воздействия ледового поля, F_{total}/F_1

Расстояние между опорами	Угол воздействия ледового поля	Эксперимент		Численная модель
		$V=0.01$ м/с	$V=0.05$ м/с	
$6D$	0°	1.73	2.34	2.1
$6D$	30°	2.9	3.62	3.4
$6D$	45°	2.53	2.51	2.5

где V – скорость прорезания моделью ледового поля.

Сопоставление результатов численного моделирования с исследованиями в Охотском море и в Крыловском научном центре говорит о том, что представленная численная модель льда может быть использована для исследования общих закономерностей и физики процесса взаимодействия ледовых полей с гидротехническими сооружениями, и давать достаточно близкие к натурным экспериментам результаты.

В четвертой главе в рамках выполнения аналитических и численных исследований взаимодействия ровного ледового поля с одноопорными гидротехническими сооружениями с вертикальной опорной частью были проведены следующие исследования:

- численный анализ специфики воздействия льда на одноопорные сооружения. Анализ влияния формы опоры на ледовое воздействие;

- аналитическое исследование масштабного эффекта ледовых воздействий на основе известных данных о крупномасштабных измерениях ледовых воздействий;

- численный анализ влияния зон многолетнего льда в поле однолетнего льда на ледовую нагрузку.

Результаты численного моделирования, проведенного в рамках диссертационного исследования, показали, что значения коэффициента формы опоры могут отличаться от тех, что представлены в стандарте СП 38.13330.2012. Значения m , которые получены численным моделированием, представлены в таблице 2: в случае отсутствия смерзания со льдом опоры с передней гранью полуциркульного очертания и в виде многогранника дают значения m выше, чем те, что представлены в СП 38.13330.2012, а именно 0.9-0.92 вместо 0.83. Значение $m = 0.90$ для многогранника было представлено и в стандарте СНиП II-57-75 (предыдущая редакция стандарта «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения»). В случае смерзания льда с опорой, численное моделирование показывает увеличение нагрузки не только для опор с передней гранью полуциркульного очертания и в виде многогранника, но и для прямоугольных опор.

Таблица 2 - Коэффициенты формы опоры m

Коэффициент формы опоры в плане m	Опора с передней гранью в виде	
	полуциркульного очертания (многогранника)	прямоугольника
<i>при отсутствии смерзания льда с опорой</i>		
СП 38.13330.2012	0.83	1.0
Численное моделирование	0.90 (0.92)	1.0
<i>при наличии смерзания льда с опорой</i>		
СП 38.13330.2012	1.26	1.0
Численное моделирование	1.29 (1.23)	1.23

В разделе 4.3 Главы 4 было проведено исследование масштабного эффекта ледовой нагрузки на фоне известных данных натурных измерений ледовых воздействий на ГС. Основной целью исследования было уточнение методики определения максимальной ледовой нагрузки по СП 38.13330.2012. Как известно, коэффициент смятия k_b по СП 38.13330.2012 учитывает зависимость ледовой нагрузки только от отношения b/h , без учета площади контакта ледового поля с сооружением. В результате при определенных условиях могут возникать ошибки в расчетах, что наглядно изображено на рисунке 4:

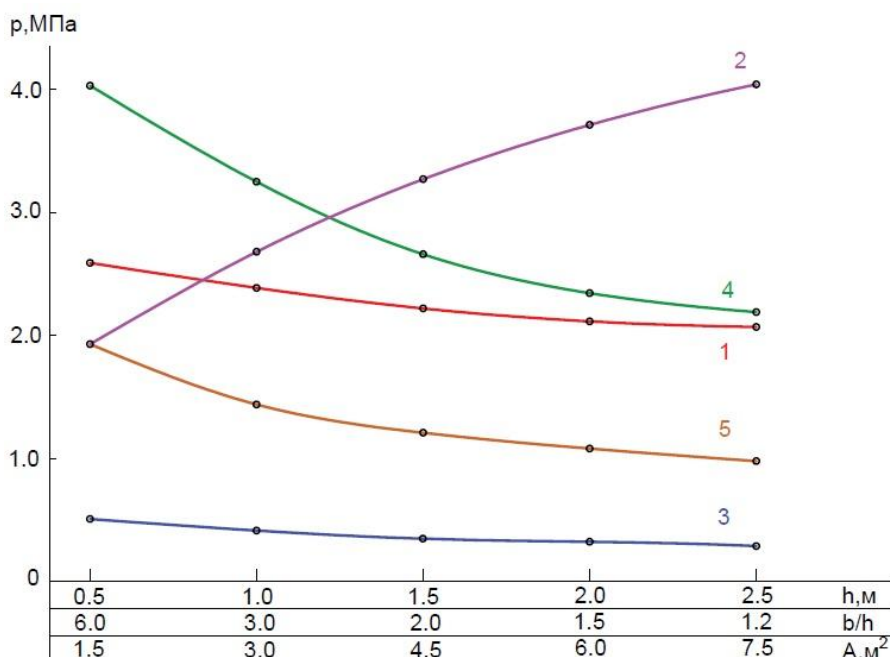


Рисунок 4 - График зависимости ледового давления p от толщины льда: 1 – по ISO 19906 для Арктической зоны; 2-по СП38.13330.2012 при температуре верхней кромки льда -5°C ; 3 – график изменения давления льда на опоры диаметром $D=2\text{м}$ в Желтом море; 4 – на измерительную панель шириной $b=1.13\text{м}$ (Моликпак); на измерительные панели шириной $b=1.2\text{м}$ на маяк Норстремсгунд в Балтийском море

С целью более корректного учета масштабного эффекта также было выведено аналитическое решение по принципу, предложенному ранее К.Н.Шхинеком и S.Loset:

$$p = a_1(b/h)^{\alpha} * a_2(bh)^{\beta} = a_3b^{\alpha+\beta}h^{\beta-\alpha} \quad (1)$$

где

p – максимальное ледовое давление, МПа;

b – ширина опоры, м;

h – толщина льда, м;

α, β – показатели степени;

a_1, a_2, a_3 – эмпирические показатели прочности.

Основной идеей при выводе аналитического решения было учесть в одной формуле основные преимущества методик определения максимальной ледовой нагрузки по СП 38.13330.2012, ISO 19906 и с учетом данных натурных измерений. В итоге аналитическое решение было представлено в виде:

$$p = mk_v k_b' k_h \tilde{R} \quad (2)$$

где

m – коэффициент формы опоры в плане по СП 38.13330.2012;

k_V – коэффициент учета скорости деформации льда по СП 38.13330.20120

k'_b – коэффициент смятия (зависимости ледового давления от отношения b/h);

k_h – коэффициент учета зависимости ледового давления от толщины льда h ;

\tilde{R} – давление льда толщиной 1 м, МПа; при этом \tilde{R} выражается формулой

$$\tilde{R} = \tilde{A}R_c \quad (3)$$

где

R_c – прочность льда на сжатие, рассчитываемая по СП 38.13330.2012, МПа;

\tilde{A} – коэффициент корреляции.

Многие исследования указывают на то, что масштабный эффект ледового воздействия значительно отличается для площади зоны контакта льда с сооружением до 30 м² и в случае большей площади. Поэтому коэффициенты k'_b , k_h , \tilde{A} отличаются для 2-х случаев:

- Площадь зоны контакта льда с сооружением $A_c = bh = 1-30$ м²:

$$k'_b = \left(\frac{b}{h}\right)^{-0.38} \quad (4)$$

$$k_h = \left(\frac{h}{h_1}\right)^{-0.76} \quad (5)$$

$$\tilde{A} = 3.3 \quad (6)$$

- Площадь зоны контакта льда с сооружением $A_c > 30$ м²

$$k'_b = \left(\frac{b}{h}\right)^{-0.17} \quad (7)$$

$$k_h = \left(\frac{h}{h_1}\right)^{-0.34} \quad (8)$$

$$\tilde{A} = 1.7 \quad (9)$$

Исследование, соответственно, проводилось также для двух случаев. Толщина льда для расчетов была принята равной $h = 2$ м. В арктических условиях это средняя максимальная толщина однолетних льдов.

Случай 1. Площадь зоны контакта льда с сооружением $A_c = bh = 1-30$ м².

Результаты расчетов ледового давления по различным стандартам, а именно СП 38.13330.2012, ISO 19906, API RP 2N, а также данные натуральных измерений, собранные Мастерсоном и Бьеркасом, приведены на рисунке 5. Рассматривалось изменение ледового давления при увеличении площади воздействия льда bh и при увеличении ширины опорной конструкции сооружения b .

На рисунке 5 видно, что для относительно теплого толстого однолетнего льда с температурой верхней кромки льда $T=-5^{\circ}\text{C}$ СП 38.13330.2012 дает расчетное давление льда сопоставимое с расчетным давлением по ISO 19906, принятым для Арктической зоны, и по API RP 2N. Данный факт говорит о завышенном значении либо прочностного параметра льда, либо коэффициента смятия k_b , определяемых по СП 38.13330.2012.

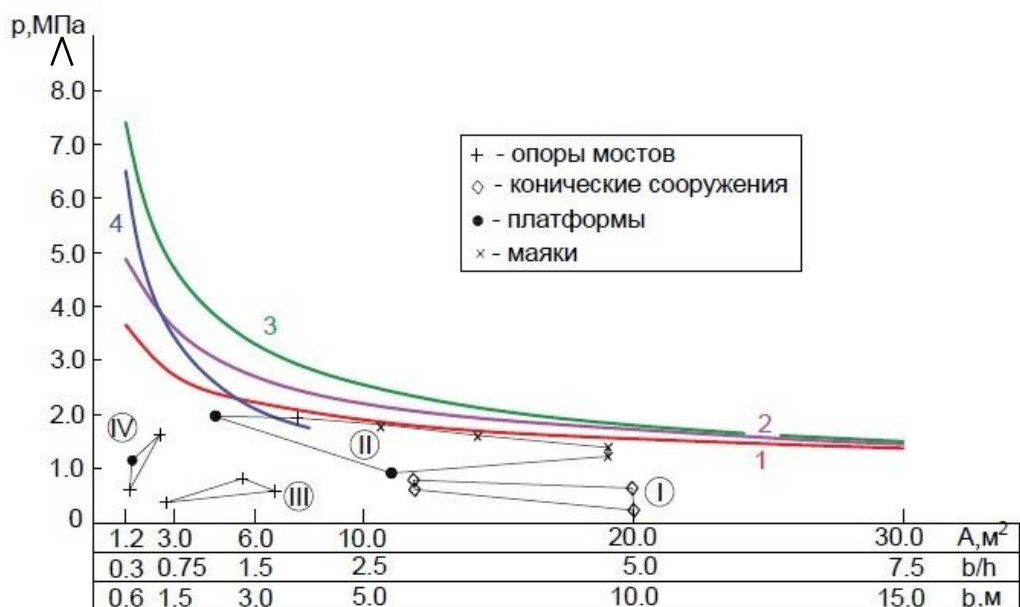


Рисунок 5 - График зависимости ледового давления p от площади воздействия льда A_c : 1 – по ISO 19906 для Арктической зоны; 2-по СП38.13330.2012 при температуре верхней кромки льда -5°C ; 3-по API RP 2N – с учетом 2-х стандартных отклонений; 4-кривая Мастерсона по результатам натуральных испытаний при $b/h < 2$; I-случаи ледового воздействия на конические сооружения шириной до 4м; II-на вертикальные сооружения шириной 2-8.5м; III-на опоры мостов и платформ от теплого льда; IV-на опоры морских сооружений в умеренных широтах

На рисунке 6 представлены графики ледового давления, рассчитанные в том числе по выведенному аналитическому решению (формула 2), которое дает близкие к натурным значения ледового давления. Видно, что аналитическое решение (формула 2) для зимнего холодного льда при температуре верхней кромки льда $T=-10^{\circ}\text{C}$ дает значения ледового давления немного ниже, чем по ISO 19906 (значения давления по ISO считаются достаточно консервативными, с учетом многолетнего льда). В то же время видно насколько завышенным для толстого однолетнего льда является расчетное ледовое давление по СП 38.13330.2012.

Основным результатом аналитических исследований учета масштабного эффекта в СП 38.13330.2012 при расчетах максимальной нагрузки на одноопорное (не протяженное) сооружение является следующее: для ровного льда толщиной 1м расчетное давление по СП 38.13330.2012 не значительно отличается от значений по выведенному аналитическому решению (формуле 2) и ISO 19906 - $\pm 15\%$ (т.е. близко к реальным нагрузкам); для ровного льда

толщиной 1.5м разница в значениях может составлять до **30%** (больше по СП); для ровного льда толщиной 2.0м разница составляет до **80%** (больше по СП). Таким образом, для **ровного льда толщиной более 1.5м расчетные нагрузки по СП 38.13330.2012 на непротяженные сооружения могут быть сильно завышены.**

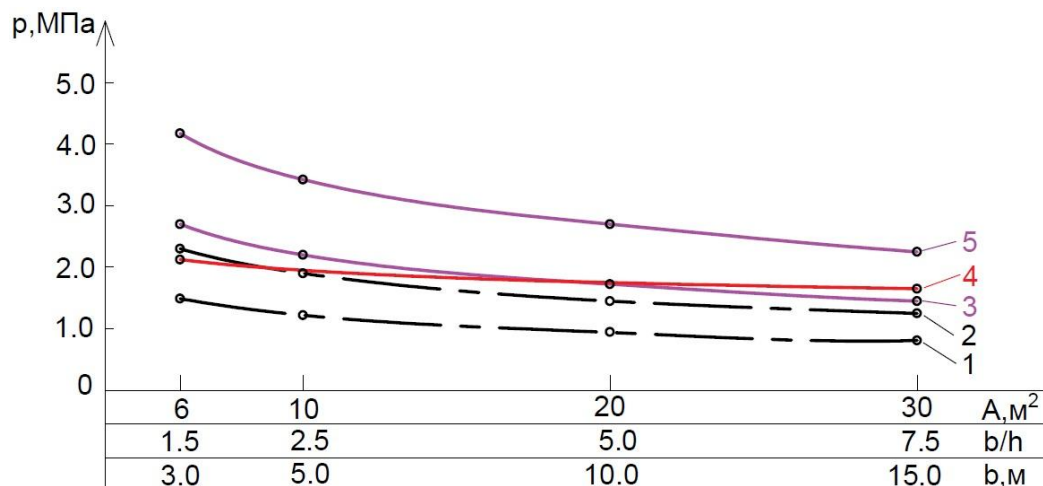


Рисунок 6 - График ледового давления p , рассчитанного по: 1 – по формуле (2) при температуре верхней кромки льда $T=-5^\circ\text{C}$; 2 – по формуле (2) при температуре верхней кромки льда $T=-10^\circ\text{C}$; 3 - по СП38.13330.2012 при температуре верхней кромки льда -5°C ; 4 - по ISO 19906 для Арктической зоны; 5 - по СП38.13330.2012 при температуре верхней кромки льда -10°C

Случай 2. $A_c > 30 \text{ м}^2$ (протяженные сооружения).

Для протяженных сооружений были проведены аналогичные исследования.

На рисунке 7 изображены графики расчетного ледового давления для льда толщиной 2м по СП 38.13330.2012, API RP 2N, ISO 19906 и согласно аналитическому решению (формула 2) на фоне данных о натуральных исследованиях. Видно, что до $b/h=25$ расчетное давление по СП 38.13330.2012 имеет завышенные значения по сравнению с расчетным давлением по формуле (2), с $b/h=25$ по $b/h=250$ ($A_c=100-1000 \text{ м}^2$) происходит, наоборот, недооценка нагрузки, в том числе и на фоне данных натуральных измерений ледовых воздействий, что необходимо учитывать при определении ледовых нагрузок на широкие/протяженные сооружения.

В разделе 4.4 Главы 4 было проанализировано влияние наличия зон пониженной и повышенной прочности отдельных участков льда на общую прочность льда и ледовую нагрузку. В качестве объекта изучения был принят участок льдины размерами $6 \times 6 \times 0.6$ метров, воздействующий на прямоугольную опору шириной 3 метра. Льдина условно была разбита на 9 одинаковых частей с различной прочностью, которая была задана в данном случае при помощи различных модулей упругости $E_1 \dots E_9$, как изображено на рисунке 8. При этом $E_1=6000 \text{ МПа}$ – модуль упругости, соответствующей средней прочности.

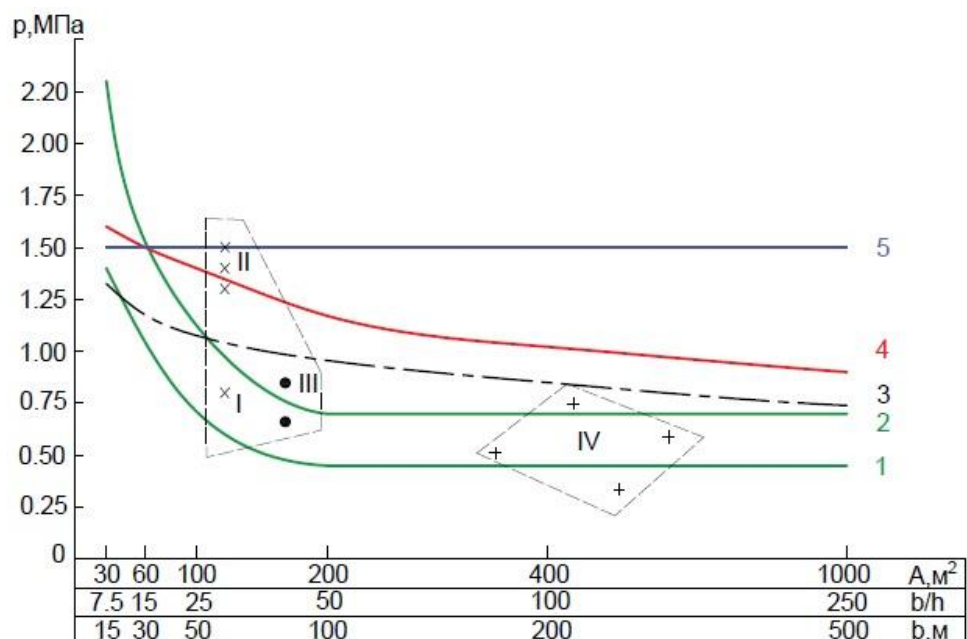


Рисунок 7 - Расчетное ледовое давление p на протяженные сооружения при $h = 2$ м, определенное согласно: 1 - СП 38.13330.2012 при $T = -5^\circ\text{C}$; 2 - СП 38.13330.2012 при $T = -10^\circ\text{C}$; 3 – формуле (2) при $T = -10^\circ\text{C}$; 4 – ISO 19906; 5 – API RP 2N; I – данные натуральных измерений воздействия весеннего однолетнего льда на платформу Моликпак; II – воздействия многолетнего льда на Моликпак; III - воздействия однолетнего льда на кессон шириной 150 метров; IV – воздействия однолетнего льда на остров Ганса, Канада.

Результатом исследования стал тот факт, что для оценки силового воздействия от ледового поля, где имеются включения многолетнего льда, стоит принимать прочностные характеристики именно многолетнего льда. Это утверждение подтверждается также натурными данными о воздействии ледовых полей на платформу Моликпак. При проведении измерений ледовых нагрузок на Моликпак было зарегистрировано воздействие на платформу однолетнего ледового поля с включениями многолетнего льда. При этом было отмечена повышенная ледовая нагрузка в среднем в 1.4-1.5 раза.

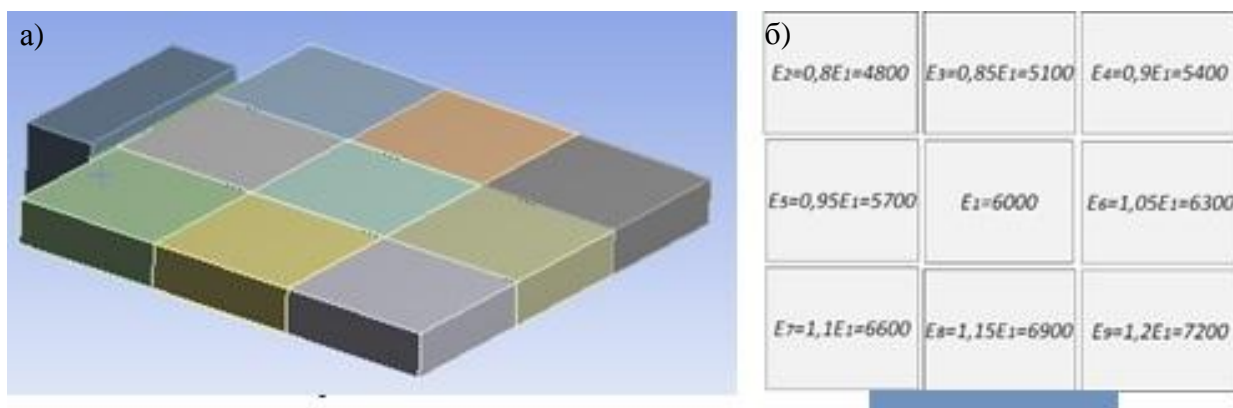


Рисунок 8 - а) – ледовое поле, условно разбитое на 9 частей разной прочности; б) значения модулей упругости отдельных зон моделируемой льдины

В пятой главе был проведен численный анализ взаимодействия ровного ледового поля с многоопорными гидротехническими сооружениями с вертикальной опорной частью.

В разделе 5.2 Главы 5 был проведен численный анализ эффекта взаимовлияния соседних опор на суммарную ледовую нагрузку для четырехопорной и трехопорной конструкции.

Основными выводами исследования воздействия ледового поля на четырехопорное сооружение были следующие:

1. Воздействие ровного ледового поля на четырехопорную конструкцию (при толщине льда $h=0.5$ и $h=1.0$ м) дают соотношение $F_{total}/F_1=1.9-3.4$, что, в целом, соответствует результатам ранее проведенных исследований. При этом для более тонкого льда, толщиной – 0.5 м, $F_{total}/F_1=1.9-3.2$, для льда толщиной $h=1.0$ м - $F_{total}/F_1=1.9-3.4$.

2. Наибольшая нагрузка отмечается, когда лед воздействует на все четыре опоры и когда опоры второго ряда не находятся в тени передних опор (полностью или частично), что бывает когда угол воздействия льда на опору лежит в диапазоне $20-30^\circ$.

3. Согласно проведенному численному исследованию эффект взаимовлияния опор (F_{total}/F_1) при $L/D=6$ и $L/D=8$ значительно не отличаются, в результате чего можно констатировать, что для $L/D>8$ эффект взаимовлияния опор значительно изменяться не будет, т.е. $F_{total}/F_1=const$.

4. Как показал численный эксперимент толщина льда имеет большое влияние на эффект взаимовлияния опор. Этот эффект имеет место потому, что при определенных условиях (высокой гибкости льдины или ее отдельного участка) лед разрушается при контакте с опорами второго ряда не путем дробления, а результате потери устойчивости, как изображено на рисунке 9а. В ходе численного моделирования разрушение льда при воздействии на опоры заднего ряда путем потери устойчивости (рисунок 9а) наблюдалось при толщине льда $h=0.5$ м ($D/h=6$). При толщине льда $h=1.0$ м ($D/h=3$) лед разрушался на сжатие дроблением (рисунок 9б).

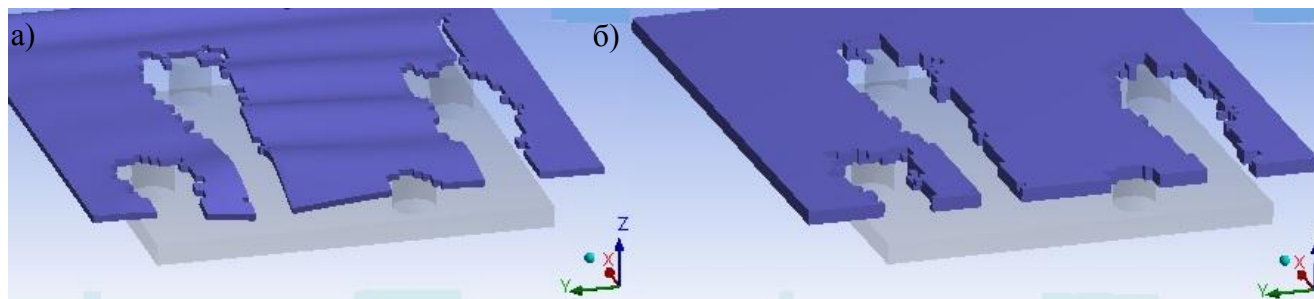


Рисунок 9 - Схема разрушения ледового поля при $L/D=6$ и $\alpha=22^\circ$: а) $h=0.5$ м; б) $h=1.0$ м

Основными выводами исследования воздействия ледового поля на трехопорное сооружение были следующие:

1. В зависимости от угла воздействия ледового поля на трехопорную конструкцию отношение суммарной нагрузки к нагрузке на одну опору F_{total}/F_1 может варьироваться в диапазоне 1.9-2.9. При этом для более тонкого льда, толщиной – 0.5м, $F_{total}/F_1=1.9-2.8$, для льда толщиной $h=1.0\text{м}$ - $F_{total}/F_1=1.9-2.9$.

2. Также как и в случае с четырехопорным сооружением толщина льда имеет влияние на значение F_{total}/F_1 . Для льда толщиной $h=0.5\text{м}$ отмечается в основном характер разрушения льда при потере устойчивости ледового поля, что существенно снижает ледовую нагрузку.

В разделе 5.3 Главы 5 был проведен численный анализ эффекта затора ледовой массы в пространстве между опорами для четырехопорного и трехопорного сооружения.

Четырехопорная конструкция

В отдельных случаях наличие заторной массы неизбежно ведет к увеличению нагрузки, а именно при углах воздействия льда $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$ (рисунок 10). Нагрузка от ровного ледового поля через заторную массу передается на теньевые опоры, которые в случае отсутствия затора остаются нетронутыми. В таблице 3 представлены значения суммарной ледовой нагрузки на четырехопорное сооружение при $L/D=3$ с учетом затора между опорами и без него.

По результатам моделирования подтверждается обоснованность введения дополнительного коэффициента учета эффекта ледяного затора при определении суммарной нагрузки на четырехопорное сооружение, когда $L/D < 4$. Значение этого коэффициента необходимо обосновывать для отдельных случаев, но как показали исследования, наличие затора может увеличивать суммарную ледовую нагрузку не более, чем на 10% ($K_{затора} = 1.1$).

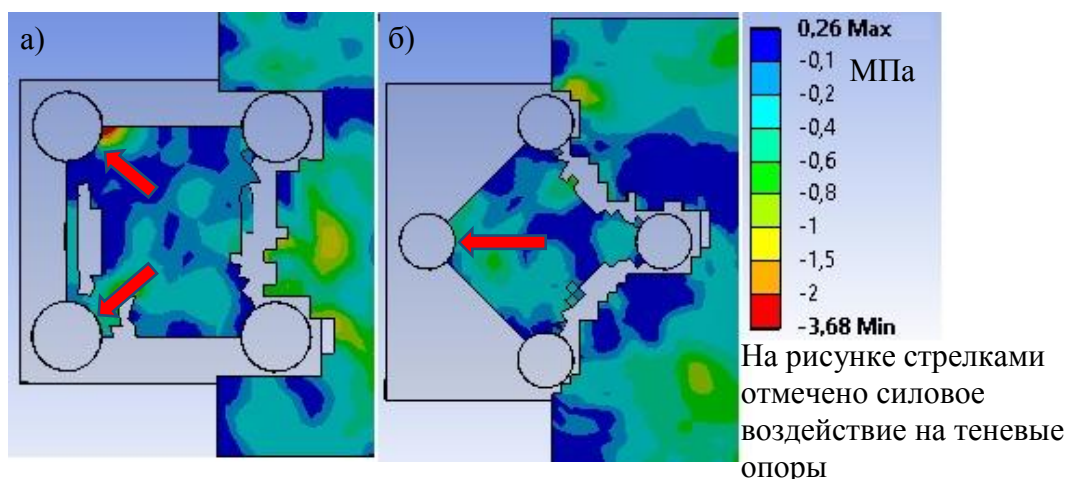


Рисунок 10 - Поле главных нормальных напряжений ледового поля: а) $\alpha = 0^\circ$; б) $\alpha = 45^\circ$

Таблица 3 - Значения суммарной нагрузки на четырехопорное сооружение

	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 22,5^\circ$	$\alpha = 45^\circ$
Без затора	1.9 МПа	2.4 МПа	2.6 МПа	2.6 МПа
С затором	2.19 МПа (+15%)	2.52 МПа (+5%)	2.65 МПа (+2%)	2.86 МПа (+10%)

Трехопорная конструкция

Для трехопорной конструкции было проведено аналогичное исследование. Результаты численного моделирования не показали существенного увеличения нагрузки по сравнению со случаем отсутствия затора.

В **шестой главе** была проведена оценка ледовой нагрузки от ледового поля на наружную стенку защитных гидротехнических сооружений атомной станции Певек в районе Чаунской губы Восточно-Сибирского моря. При исследовании использовалась численная модель, разработанная в рамках диссертации, а также аналитическое решение для определения максимальной ледовой нагрузки. Основной целью исследования было проследить изменчивость основных ледовых параметров на протяжении ледового сезона и ледовой нагрузки.

На основании исходных статистических данных, собранных для исследуемого района, был построен совместный график (рисунок 11) изменения расчетной толщины льда и средней прочности льда в течение ледового сезона с января по май. Видно, что в период взлома и начала дрейфа льда, который по статистике имеет место в конце мая – середине июня, прочность льда составляет 20-30% от максимальной прочности льда в течение ледового сезона. В апреле, как видно, кривые прочности льда и толщины пересекаются, и дрейфующий лед (в случае возможности дрейфа) мог бы вызвать наибольшую нагрузку на сооружение.

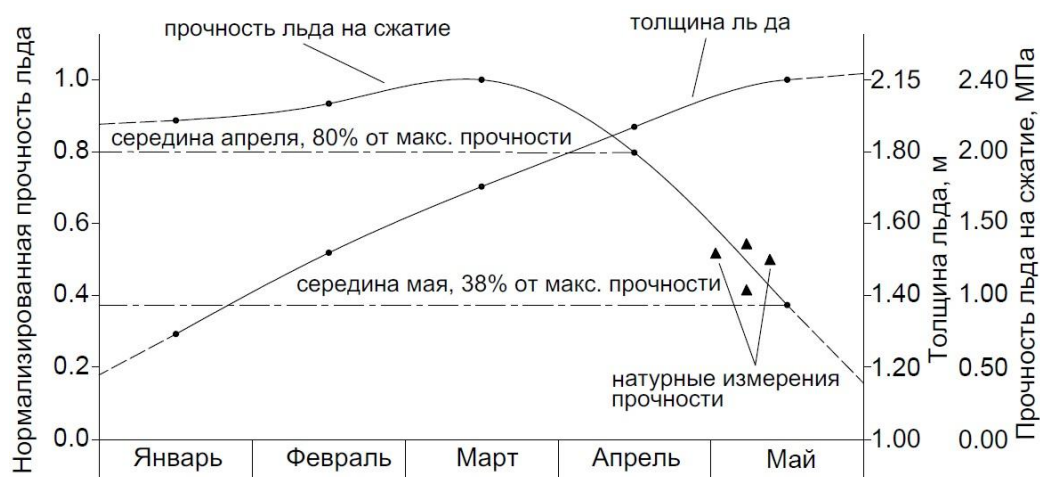


Рисунок 11 - График изменения толщины и прочности льда в акватории порта Певек

В рамках исследования был выполнен вывод коэффициента $k_{\beta i}$ для протяжённого наклонного сооружения. Данный коэффициент учитывает снижение нагрузки на вертикальную стенку, образованную смерзшимся льдом на поверхности наклонной конструкции. В СП 38.13330.2012 он представлен только для случая подвижки смерзшегося с коническим сооружением ледового поля. Его значение для угла наклона $\beta = 45^\circ$ равно $k_{\beta i} = 0,6$. Было смоделировано 4 сценария, представленные на рисунке 12. По результатам моделирования для протяженной наклонной конструкции был получен коэффициент, равный $k_{\beta p} = 0,8$.

В таблице 4 представлены расчеты ледовой нагрузки от ровного дрейфующего льда на внешнюю стенку защитного мола ПАТЭС в г. Певек по методике из СП 38.13330.2012, ISO 19906 и по выведенному аналитическому решению (формула 2). Расчет ограничен месяцем маем, так как по статистике в мае случается самая ранняя подвижка льда. В июне и июле толщина льда будет только уменьшаться, так же как и его прочность.

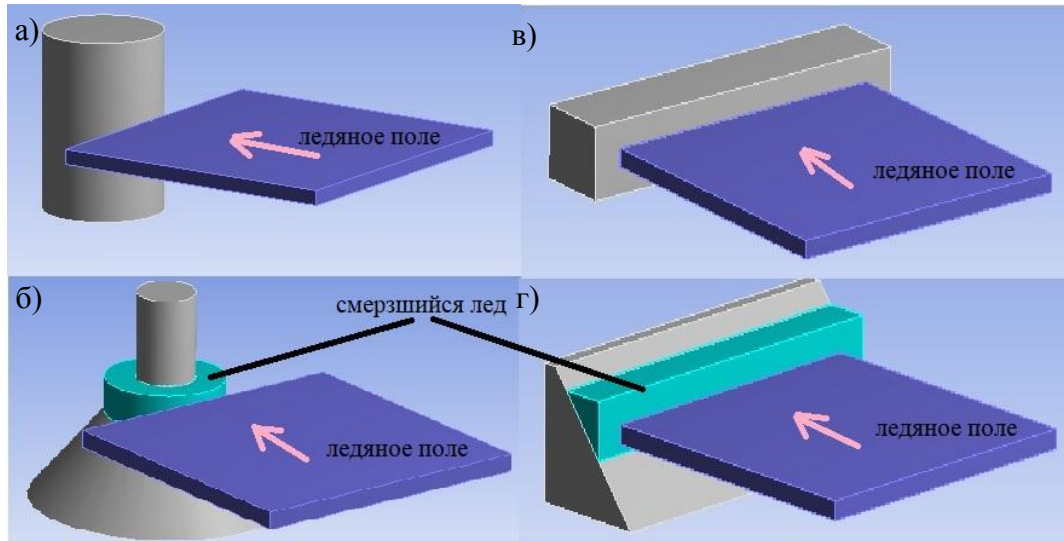


Рисунок 12 - Сценарии воздействия льда на: а) цилиндрическую опору; б) коническую опору со смерзшимся льдом; в) вертикальную стенку; г) наклонную стенку со смерзшимся льдом на ней

Таблица 4 - Расчетные значения ледовой нагрузки от ровного дрейфующего льда, МН

Расчетная нагрузка	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май (дрейф)
1. На наклонную стенку в отсутствие на ней смерзшегося льда по формуле 54 СП 38.13330.2012	74.6	77.3	78.9	78.7	75.5
2. На вертикальную стенку, образованную смерзшимся льдом					
2.1. По формуле 51 из СП 38.13330.2012	105.6	129.3	151.4	149.4	109.9
2.2. По формуле 53* из СП 38.13330.2012	205.3	258.1	312.6	275.5	138.7
2.3. По формуле (2)* (аналитическое решение)	246.0	294.0	329.8	308.3	153.3
2.4. Расчет согласно положениям ISO 19906	257.2	299.5	333.1	362.9	386.2

*-учитывается снижающий коэффициент $k_{\beta p} = 0.8$.

По результатам исследования были сделаны следующие выводы:

1. Нагрузка на наклонную стенку относительно стабильна на протяжении всего ледового сезона. Рост толщины льда пропорционален падению его прочности на изгиб. Заметное снижение нагрузки ожидается только при повышении температуры воздуха и воды выше 0°C , когда и толщина, и прочность будут одновременно снижаться.

2. Нагрузка на вертикальную стенку изменяется на протяжении зимы. Для климатических условий порта Певек максимальную ледовую нагрузку можно было бы ожидать в марте-апреле. Но фактически подвижка льда происходит не раньше мая, когда нагрузка составляет, примерно, половину от ее максимального значения в течение зимы. Это подтверждает обоснованность положения о том, что *максимальная ледовая нагрузка от дрейфующего льда должна определяться для месяца первого взлома льда, принятого на основе долгосрочных наблюдений или путем статистического реанализа ледовых условий на основе метеорологических данных*. Иначе, переоценка ледовой нагрузки будет более, чем в 2 раза.

3. При расчете ледовой нагрузки по формуле 53 из СП 38.13330.2012 возможна некоторая недооценка нагрузки. Натурные данные, и аналитическое решение дают значения на 10% выше (для причала ГС ПАТЭС Певек длиной 240м).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы диссертационной работы состоят в следующем:

1. На базе программного комплекса ANSYS была разработана численная модель ледового поля. В качестве модели материала была принята модель Мора–Кулона. Верификация численной модели была проведена путем сравнения результатов расчета с данными натурных испытаний. Сопоставление показало хорошее согласие результатов численных и натурных измерений.

2. Результаты численного моделирования, проведенного в рамках исследования, показали, что значения коэффициента формы опоры m могут отличаться от тех, что представлены в стандарте СП 38.13330.2012. Для опоры с передней гранью полуциркульного очертания или в виде многоугольника при отсутствии смерзания льда с опорой коэффициент формы опоры рекомендуется принимать 0,9, вместо 0,83, который принят в СП 38.13330.2012. В случае смерзания льда с опорой численное моделирование показывает увеличение нагрузки не только для опор с передней гранью полуциркульного очертания и в виде многогранника, но и для прямоугольных опор. В последнем случае коэффициент m должен быть принят 1,23, вместо 1,0, который рекомендуется в СП 38.13330.2012.

5. Численное моделирование показало, что в случае наличия в ледовом поле зон высокой прочности ввиду присутствия участков многолетнего льда ледовая нагрузка должна определяться на основе прочностных характеристик именно многолетнего льда.

6. Сопоставлением результатов расчетных нагрузок по СП 38.13330.2012, ISO 19906, API RP 2N между собой и с данными натурных измерений ледовых воздействий, было получено аналитическое решение для определения ледовой нагрузки от ровного поля при разрушении льда, которое учитывает зависимость ледового давления от отношения ширины опоры к

толщине льда b/h и от толщины льда h , что подтверждается множеством проведенных натуральных исследований. Результаты расчетов ледовой нагрузки по полученному аналитическому решению дали результаты, близкие к результатам натуральных измерений.

7. В случае непротяженных сооружений расчетная нагрузка по СП 38.13330.2012 для толстых однолетних льдов дает завышенные значения. Основной причиной является факт не совсем корректного учета масштабного эффекта ледовой нагрузки.

Для ровного льда толщиной 1м расчетная нагрузка по СП 38.13330.2012 незначительно отличается от значений нагрузки по выведенному аналитическому решению и ISO 19906 - $\pm 15\%$; для ровного льда толщиной 1.5м разница в значениях может составлять до **30%** (больше по СП); для ровного льда толщиной 2.0м разница составляет до **80%** (больше по СП). Таким образом, **для ровного льда толщиной более 1.5м расчетные нагрузки по СП 38.13330.2012 на непротяженные сооружения могут быть сильно завышены.**

8. В случае протяженных сооружений для толстого однолетнего льда при $b/h < 25$ расчетная нагрузка по СП 38.13330.2012 имеет завышенные значения по сравнению с расчетной нагрузкой по выведенному аналитическому решению; при $25 < b/h < 250$ происходит, наоборот, недооценка нагрузки, что необходимо учитывать при определении ледовых нагрузок на широкие/протяженные сооружения.

9. На основе результатов численного исследования влияния затора льда в межопорном пространстве многоопорного сооружения на суммарную ледовую нагрузку, были предложены положения о введении коэффициента затора K_3 в формулу по СП 38.13330.2012 и его соответствующие значения. Численные исследования показали правомерность введения коэффициента учета эффекта ледяного затора при определении суммарной нагрузки на четырехопорное сооружение, когда отношение расстояния между опорами к диаметру опоры $L/D < 4$. Значение этого коэффициента необходимо обосновывать для отдельных случаев, но, как показали результаты моделирования, для учета эффект затора можно принять $K_3 = 1.1$.

10. Численное моделирование показало, что эффект взаимовлияния соседних опор многоопорного сооружения на суммарную ледовую нагрузку определяется тремя основными факторами:

- углом воздействия льда относительно планового расположения конструкции;
- расстоянием между опорами;
- толщиной льда.

11. Численное моделирование показало, что значение $n_t K_1 K_2$ для четырехопорного сооружения для льда толщиной $h < 1.0$ м и условия $L/D < 6$ может быть значительно меньше (на

20-30%), чем расчетное по СП 38.13330.2012, ввиду разрушения льда в большей степени на сжатие путем потери устойчивости, чем на сжатие дроблением.

12. При определении максимальных ледовых нагрузок от дрейфующего ровного льда необходимо строить помесячные статистические характеристики основных ледовых параметров льда (период статистических данных должен быть не менее 50 лет) и определять помесячные максимальные нагрузки. Наибольшая из этих нагрузок (с учетом самого раннего срока взлома и дрейфа льда) и будет максимальной. Анализ изменчивости характеристик ледового покрова на протяжении ледового сезона на примере оградительных сооружений порта ПАТЭК в г. Певек показал рациональность такого подхода.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

В дальнейшем для совершенствования методик определения ледовых нагрузок от дрейфующих ледовых полей требуется проводить натурные измерения ледовых воздействий на гидротехнические сооружения, развивать численные и физические методы моделирования, уточнять расчетные положения и отдельные коэффициенты в стандартах по расчету ледовых нагрузок.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Политько В.А., Кантаржи И.Г. Анализ факторов ледовой нагрузки на вертикальные сооружения при разрушении льда // Гидротехническое строительство. 2017. № 12. С. 38-46.
2. Политько В.А., Кантаржи И.Г. Воздействия ровного ледового поля на многоопорные гидротехнические сооружения // Инженерно-Строительный Журнал. 2017. № 06 (74). С. 43-52.
3. Политько В.А., Кантаржи И.Г. Расчет морских ледостойких сооружений на действие ледовых нагрузок с учетом российских строительных норм // Гидротехническое строительство. 2017. №1. С. 27-35.
4. Политько В.А., Кантаржи И.Г. Исследуемые характеристики льда, необходимые для определения ледовых нагрузок // Вестник МГСУ. 2015. №12. С. 106-117.
5. Политько В.А., Кантаржи И.Г. Обеспечение безопасной работы и надежности при проектировании стационарных ледостойких морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений // Вестник МГСУ. 2015. №11. С. 167-177.

Публикации в материалах конференций и других изданиях:

6. Политько В.А., Кантаржи И.Г. Численное моделирование воздействия ледовых полей на гидротехнические сооружения // Строительство – формирование среды жизнедеятельности:

сборник трудов Двадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых / Мин-во образования и науки РФ. М.: МГСУ. 2017. С. 1184-1187.

7. Политько В.А., Кантаржи И.Г., Мордвинцев К.П. Ледовые нагрузки на морские гидротехнические сооружения: учебное пособие. М.: Издательство МГСУ-МИСИ. 2016. 90 с.

8. Политько В.А., Кантаржи И.Г. Особенности ледовых условий и ледовых нагрузок на шельфовые сооружения в Северном Каспии // Обеспечение гидрометеорологической и экологической безопасности морской деятельности: сборник трудов международной научно-практической конференции. Астрахань: КАСПКОМ. 2015. С. 133-135.

9. Политько В.А., Кантаржи И.Г. Ледовые нагрузки на морские гидротехнические сооружения // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сборник трудов Восемнадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых / Мин-во образования и науки РФ. М.: МГСУ. 2015. С. 394-397.