ОТЗЫВ

Официального оппонента кандидата технических наук, доцента, доцента Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» Шарапова Дмитрия Андреевича на диссертацию **Казунина Ивана Дмитриевича** по теме: **«Технология снижения ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения закрытых акваторий портов с помощью иррегулярно вмораживаемых объектов»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.6 Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология.

Актуальность темы исследования

Большое количество морских гидротехнические сооружения относятся к объектам повышенного класса опасности. Обеспечение устойчивого функционирования данных объектов представляет собой одну из ключевых задач в рамках освоения арктического континентального шельфа. Ледовые нагрузки в условиях Севера являются одними из основных, определяющих конструкцию сооружения. Для минимизации рисков и обеспечения безопасной эксплуатации портов с сезонным ледовым покрытием необходима реализация комплекса противоледовых мероприятий: создание систем, поддерживающих акваторию в состоянии, свободном ото льда, посредством его механического разрушения; снижение интенсивности ледообразования; контроль траектории дрейфа ледовых полей и их эвакуация с защищаемой территории. Совершенствование указанных систем нацелено на разработку и внедрение инновационных технологий снижения ледовых нагрузок, что позволит минимизировать зависимость эксплуатационных параметров от вариабельности климатических условий и специфических конструктивных решений гидротехнических сооружений. Актуальность настоящего исследования определяется следующими факторами:

1. Потребностью в повышении эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений на ограниченных акваториях портов путем снижения величин действующих на них ледовых нагрузок.
2. Необходимостью обеспечения гарантированной функциональности арктических морских портов в условиях отсутствия в их акватории специализированного ледокольного флота, требуемого для проводки и швартовки грузовых судов.

Структура и содержание работы

На отзыв представлены диссертация и автореферат. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 101 наименований, 4 приложений. Общий объем диссертации без приложений составляет 151 страницу, включая рисунки и таблицы. Автореферат диссертации отражает основные положения диссертационной работы, содержит список работ соискателя, основные результаты и выводы.

Во введении диссертации отражены такие характеристики работы как ее актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, поставлены задачи исследований, отражен личный вклад соискателя в проведенные исследования.

Первая глава представляет собой комплексный анализ проблем и существующих технологий защиты гидротехнических сооружений в арктических портах от ледовых нагрузок. Описываются ключевые проблемы эксплуатации портов в условиях Крайнего Севера, выделяются основные типа опасных ледовых воздействий, в том числе: статические нагрузки, возникающие при вмерзании сооружения в лёд и связанные с термическим расширением и колебаниями уровня воды, и динамические нагрузки, вызванные движением ледовых полей или передачей усилий от судов ледового класса через ледяной покров.

Проводится обзор существующих технологий борьбы со льдом, которые систематизированы по группам. Среди механических способов основное внимание уделяется использованию ледоколов, при этом отмечается, что их работа в непосредственной близости от причалов может сама по себе представлять опасность для конструкций. Рассматриваются и термические методы, в частности барботажные системы, использующие теплую воду со дна. Кратко характеризуются другие подходы — электрофизические, химические, взрывные и комбинированные, которые обладают ограниченной областью применения или высокой ресурсоемкостью. Анализируются технологии усиления самих конструкций ГТС, такие как строительство защитных молов, установка ледорезов и бандажных конструкций.

В результате проведенного анализа, сделан вывод о том, что существующие технологии обладают существенными недостатками, такими как потенциальная опасность для сооружений, образование донного льда, высокая стоимость и сильная зависимость от внешних условий, что не позволяет обеспечить надежную и универсальную защиту для большинства ГТС в закрытых акваториях арктических портов. Это обосновывает необходимость разработки принципиально нового решения. В качестве такого решения предлагается технология, основанная не на активном разрушении льда или усилении конструкций, а на пассивном ослаблении ледового покрова. Идея заключается в использовании иррегулярно вмораживаемых объектов (ИВО) — шарообразных поплавков, которые, замерзая в ледяном

поле, нарушают его структурную однородность, создавая перфорацию и концентрацию напряжений, что приводит к снижению прочности ледового покрова на изгиб и уменьшает усилия, передаваемые на наклонные грани гидротехнических сооружений.

Вторая глава посвящена теоретическому обоснованию новой технологии снижения ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения с помощью иррегулярно вмораживаемых объектов. Приводится описание предлагаемого метода, который заключается в искусственном ослаблении ледового поля путём его перфорации сферическими объектами, размещаемыми на акватории порта. Эти объекты, вмораживаясь в лёд, нарушают его структурную целостность, создавая концентрацию напряжений и снижая прочностные характеристики ледяного покрова. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить усилия, передаваемые на ГТС как от движущихся судов ледового класса, так и от дрейфующих ледовых полей, и потенциально отказаться от использования дорогостоящих ледоколов.

В главе приведен теоретический анализ взаимодействия ледового поля с различными типами поверхностей ГТС: остро- и тупо- наклонными, где происходит разрушение льда изгибом, и вертикальными, где лед разрушается сжатием. На основе методов теоретической механики выводятся системы уравнений, определяющие критические условия для начала и полного завершения процесса разрушения льда изгибом. Автор устанавливает предельные углы наклона поверхности сооружения, при которых становится возможным изгиб льда, а также получает формулы для расчёта минимальных горизонтальных усилий, необходимых для его разрушения. Эти зависимости показывают, что нагрузка на вертикальную стенку всегда выше, чем на наклонную. Теоретический анализ приведён также для случая использования ИВО. В уравнения вводятся поправки, учитывающие изменение прочностных характеристик композитного материала «лёд-ИВО». Ключевым выводом является то, что для эффективного ослабления льда материал ИВО должен иметь низкий коэффициент адгезии (т.е. слабое сцепление со льдом) и плотность, близкую к плотности льда. Это обеспечивает образование в ледяном покрове сквозных перфораций, которые снижают его эффективное сопротивление изгибу. Приведенные расчёты подтверждают, что предлагаемая технология позволяет снизить горизонтальное усилие, необходимое для разрушения ледяного поля, тем самым уменьшая нагрузку, передаваемую на гидротехническое сооружение. В заключении автор формулирует вывод о необходимости экспериментальной проверки выведенных теоретических зависимостей.

Третья глава содержит результаты экспериментальных исследований, проведенных для проверки теоретических выводов предыдущей главы и оценки эффективности технологии

использования ИВО. Работа включала два типа экспериментов: полевые испытания и лабораторные исследования в ледовом бассейне.

Полевой эксперимент был проведен на озере Лахта в Санкт-Петербурге с целью сравнительного анализа прочности на изгиб образцов чистого льда и льда, усиленного или ослабленного ИВО. В ледяном покрове вырезались прямоугольные консоли, часть из которых формировалась с вмороженными пластиковыми или полиуретановыми шариками. Исследовались два типа ИВО: с высоким коэффициентом адгезии (погружены на 1/2) и с низким коэффициентом адгезии (погружены на 2/3). На свободный конец клавиши прикладывалась вертикальная нагрузка до момента излома, фиксировались разрушающая сила и расстояние до линии слома. Обработка данных показала, что ИВО с высокой адгезией приводят к усилению льда, увеличивая его прочность на изгиб. ИВО с низкой адгезией эффективно ослабляли лед, снижая его прочность. Эти результаты подтвердили теоретическую предпосылку о ключевом влиянии коэффициента адгезии материала ИВО на прочностные характеристики ледяного покрова.

Лабораторный эксперимент, проведенный в ледовом бассейне ААНИИ, был нацелен на оценку устойчивости распределения ИВО на акватории после прохождения через нее судна ледового класса. Через модельный лед со свободноплавающими ИВО проводили масштабную модель судна, после чего с помощью фото- и видеофиксации и последующего статистического анализа оценивали изменение плотности и распределения ИВО. Результаты, обработанные с использованием t-критерия Стьюдента, показали, что после двух проводок судна изменение в распределении ИВО было незначительным. Потеря и существенное «расползание» шариков за пределы защищаемой зоны не наблюдалось.

Экспериментальные исследования главы 3 подтвердили принципиальную возможность управления прочностью льда с помощью ИВО.

В четвертой главе приводится анализ свойств льда и обоснованию выбора его расчетной модели, что является важным этапом для последующего создания адекватной численной модели. Основное внимание уделено определению и математическому описанию ключевых физико-механических характеристик льда, которые напрямую влияют на его прочность и поведение. Автор проводит обзор научных источников и нормативной литературы с целью установления аналитических зависимостей таких параметров, как плотность, пористость, модуль упругости и коэффициент Пуассона, от внешних условий, главным образом от температуры и солёности.

В ходе анализа показано, что лед является сложным материалом, чьи свойства нелинейно зависят от состояния окружающей среды. Для обеспечения возможности использования этих

зависимостей в вычислительных пакетах автор применяет метод асимптотических эквивалентных замен, позволяющий преобразовать сложные и разрывные функции, встречающиеся в литературных источниках, в непрерывные и гладкие, пригодные для численных расчетов. Особое внимание уделено созданию многослойной модели льда: автор предлагает разделять ледовый покров на четыре слоя, каждый из которых характеризуется своим температурным профилем, рассчитанным на основе уравнений стационарной теплопередачи. Для каждого слоя, в зависимости от его средней температуры, солёности и пористости, рассчитываются индивидуальные значения плотности и модуля упругости.

Таким образом, в главе была проделана работа по систематизации и математической формализации свойств льда. Разработанная четырехслойная модель с непрерывными аналитическими зависимостями.

В пятой главе приводится описание численной модели предлагаемой технологии снижения ледовых нагрузок с помощью ИВО. На основе данных, полученных в ходе полевых экспериментов и теоретического анализа свойств льда, в программном комплексе Abaqus FEA была создана конечно-элементная модель. Модель воспроизводила консоль льда, лежащую на упругом основании, описываемом нелинейными пружинами, что соответствовало модели Винклера. Лед моделировался как композитный материал, состоящий из четырех слоев с различными свойствами, определенными в предыдущей главе, а влияние ИВО учитывалось через уменьшение эффективного момента сопротивления сечения и изменение жесткости упругого основания.

Произведена проверка численной модели путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными. Сравнивалось положение линии слома и концентрации напряжений. Среднее отклонение расчетных данных от экспериментальных составило около 1.33% для чистого льда, что подтвердило достоверность модели для дальнейших исследований. Были проведены многовариантные расчеты с целью поиска оптимальных параметров ИВО. Анализировалось влияние диаметра шариков и коэффициента адгезии. Расчеты показали, что ИВО с нулевой адгезией эффективно ослабляют лед, в то время как объекты с высокой адгезией, наоборот, армируют его. Были разработаны практические рекомендации по применению технологии в натурных условиях. Установлена линейная зависимость диаметра ИВО от толщины льда. Испытания в виртуальной среде подтвердили, что использование ИВО позволяет существенно снизить усилия, передаваемые через лед на причальные сооружения, при движении судна ледового класса вблизи них.

В заключении сформулированы итоги выполненного диссертационного исследования, намечены направления дальнейших разработок по теме исследования.

Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций подтверждается

- использованием общепринятых методов механики деформируемого тела и механики разрушения;

- использованием проверенного оборудования в аккредитованной лаборатории;

- выполнением обработки результатов статистическими методами;

- использованием сертифицированных программных комплексов для численного моделирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана новая технология снижения ледовой нагрузки на портовые сооружения с помощью сквозной перфорации льда, создаваемой с помощью ИВО;

- сделана теоретическая проработка взаимодействия различных наклонных поверхностей ГТС с чистым льдом и перфорированным льдом;

- подтверждена правомерность предложенных зависимостей о снижении нагрузок, передаваемых на ГТС через перфорированный лед с помощью ИВО, по сравнению с чистым льдом;

- разработана численная модель напряженно-деформированного состояния перфорированного льда;

- установлены характеристики ИВО, которые позволят максимально снизить нагрузку, передаваемую на ГТС через лед;

- предложена методика определения характеристик ИВО для использования предлагаемой 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 и практическая значимость работы заключается в следующем:

- определены зависимости для расчета горизонтальных усилий, передаваемых через перфорированное ледовое поле с помощью ИВО на ГТС;

- создании численной многослойной модели напряженно-деформированного состояния чистого льда и перфорированного льда с помощью ИВО, включающей параметризацию свойств льда и пригодной для оптимизационных расчетов;

- 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;

- предложена методика по использованию ИВО, с целью перфорации льда, в реальных масштабно-климатических условиях.

Личный вклад соискателя заключается:

- в решении теоретической задачи по взаимодействию различных наклонных поверхностей ГТС как с чистым льдом, так и перфорированным с помощью ИВО льдом;

- разработке программы и проведении полевых испытания клавиш льда с последующим анализом и обобщением полученных результатов;

- проведении анализа свойств льда для использования в многослойной численной модели;

- выполнении численного моделирования нагрузок, передаваемых на ГТС в чистом льду и в перфорированном льду;

- в разработке рекомендаций по практическому использованию предлагаемой технологии.

Замечания

1. Присутствуют опечатки, например, несогласованное предложение (стр. 9): «Необходимостью гарантированного функционирования морских арктических портов при отсутствии специализированных судов в ***его*** акватории для проведения ледокольных работ с целью обеспечения швартовки грузовых судов».
   На странице 97 в одном предложении используется обозначение "ГПа" и "Гпа".
2. Сокращение шифра нормативных документов. В работе используется шифр нормативных документов в виде «СП38.13330». Между тем «СП38.13330.2012» и «СП38.13330.2018» являются разными документами, с разным содержанием в некоторых частях. Указание ссылки на источник в списке использованной литературы не может быть основанием для сокращения шифра документа в тексте работы.
3. В работе рассматривается метод уменьшения первого максимума ледовой нагрузки при подвижке ледяного поля. Возможны регулярные колебания льда, вызванные колебаниями температуры, изменением направления ветра, течения и прочими факторами. Могут ли эти подвижки привести к снижению эффективности предлагаемого метода на замкнутой акватории?
4. Эксперименты проводились при сравнительно небольшой толщине льда 12-15мм. С увеличением продолжительности вмораживания, относительной положение ИВО будет

смещаться ближе к поверхности. Применим ли предложенный метод если вмерзание будет происходить дольше, и относительное положение ИВО в ледяном покрове окажется выше рассматриваемого?

5. Результаты эксперимента в п.3.1.3 приведены для коэффициентов адгезии, стремящихся к нулю и к единице. Является ли зависимость от коэффициента адгезии линейной? Если нет, то почему не уделено внимание промежуточным значениям коэффициента адгезии?
6. На странице 106 сделано допущение о том, что ИВО рассматривается как абсолютно твердое тело. Почему не было использовано фактическое значение жесткости для используемых ИВО? Может ли использование абсолютно-твердого тела привести к недостоверным концентрациям напряжений при моделировании и занижению результирующих нагрузок на ГТС?
7. На странице 107 указано, что для моделирования льда используется «пирог» из четырех shell элементов. Не приведены ссылки, подтверждающие правомерность такого способа моделирования ледяного покрова. Существуют различные типы shell-элементов в программном комплексе. Требуется уточнить какой именно тип shell был использован, какие свойства он моделирует, были-ли сделаны какие-то допущения при выборе типа элемента?
8. На странице 110 указано, что при рассмотрении коэффициента адгезии, стремящегося к нулю, - элементы ИВО исключались из схемы. При этом лед имеет толщину, и может передавать через ИВО нормальные напряжения, также не указано влияние силы трения. Почему нормальные напряжения, передаваемые через ИВО, не учитывались? На сколько большое значение оказывает сила трения, если она не учитывалась в модели?

Заключение

Диссертация Казунина Ивана Дмитриевича по теме: **«Технология снижения ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения закрытых акваторий портов с помощью иррегулярно вмораживаемых объектов»**, является полностью завершенной, самостоятельной, отвечающей требованиям к научно-квалификационным исследованиям работой, выполнена на актуальную тему, содержит технические решения и разработки, отличающиеся новизной и практической значимостью, связанные со способам уменьшения ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения. Предлагаемая технология использования ИВО является новым подходом к управлению прочностью льда на замкнутых акваториях. Полученные новые знания о методе учета ИВО при расчете нагрузок от льда способствуют развитию гидротехнической отрасли наук. Автореферат отражает основное содержание диссертационной работы, ее выводы и заключение.

Диссертационная работа Казунина Ивана Дмитриевича по теме: **«Технология снижения ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения закрытых акваторий портов с помощью иррегулярно вмораживаемых объектов»** соответствует критериям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.1.6 - «Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология» за новые технические решения и разработки, связанные с совершенствованием методологии учета ИВО при расчете нагрузок на гидротехнические сооружения, что имеет важное значение для гидротехнического строительства и строительной отрасли в целом.

Официальный оппонент, контактные данные:

ФИО: Шарапов Дмитрий Андреевич

Ученой степень: кандидат технических наук;

Ученое звание: доцент

Специальность, по которой защищена диссертация: 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

Должность: доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Почтовый адрес: Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б.

Контактный телефон: +7 (812) 775-05-30.

E-mail: sharapov_da@spbstu.ru

/Шарапов Дмитрий Андреевич /

Подпись Шарапова Д.А.
УДОСТОВЕРЯЮ
Ведущий специалист
по кадрам Рагейко К.И.
«30» 10 2025 г.