ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента **Цуприка Владимира Григорьевича** на диссертационную работу **Казунина Ивана Дмитриевича:** «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

Область исследования, структура и объем работы

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.

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, список литературы из 101 наименований, а также 4 приложения.

Содержание работы

Во введении диссертации обоснована ***актуальность*** темы исследований, степень ее разработанности, ***научная новизна, практическая и теоретическая*** значимость, описаны ***объект и предмет*** исследования, сформулирована ***цель и задачи*** исследования, защищаемые положения, общая характеристика и структура работы.

Актуальность темы исследования обусловлена все возрастающим вниманием к развитию экономического освоения Арктики, в частности транспортному и индустриальному освоению побережий арктической морей, развитию прибрежных предприятий и объектов для по добыче ресурсов, залегающих в недрах шельфов. ***Актуальность*** рассматриваемой в диссертации Казунина И.Д. конкретной задачи связана с комплексной проблемой освоения побережий замерзающих морей с использованием объектов морского транспорта, а именно с необходимостью ***выработки научно обоснованного решения задачи снижения ледовой нагрузки на морские портовые гидротехнические сооружения (ГТС),*** возникающей как от прямого воздействия ледовых образований в закрытых акваториях северных портов на конструкции таких объектов, так и воздействия льда в виде передачи ледовой нагрузки от судов при их перемещениях в акваториях северных портов.

Цель диссертационной работы автор сформулировал исходя из результатов обобщения и анализа данных литературных источников и требований нормативных документов как «*снижение* 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)».

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

Предметом исследования в понимании автора являются физико-механические свойства перфорированного льда, созданного с помощью иррегулярно вмораживаемыми объектами (ИВО), в условиях низких температур на поверхности воды на закрытых акваториях портов.

В первой главе диссертант выполнил обзор литературы по теме исследования. Им рассмотрен и проанализирован отечественный и мировой опыт разработки и применения технологий снижения ледовых нагрузок на ГТС на акваториях портов, выделены наиболее распространенные способы борьбы с ледяным покровом, образующимся на акваториях портов, снижением его толщины, прочности льда и его удаления.

На основании выполненного анализа существующей проблемы по опубликованным в мировой печати результатам исследований, описаниям реальных ситуаций в приполярных портах, рассмотренных запатентованных решений, диссертантом, ***с целью повышения долговечности и устойчивого функционирования ГТС*** морских портов Арктических регионов с закрытыми акваториями за счет снижения ледовых нагрузок, принята **технология снижения прочности ледового поля с использованием искусственно вмороженных в его массив объектов.** Кроме того, здесь же выполнено *патентное исследование* на чистоту предлагаемой для детального исследования в диссертации технологии.

Во второй главе дается детальное описание предлагаемой технологии и выполнено ее теоретическое обоснование, приведены результаты, показывающие возможность регулирования степени снижения горизонтальных усилий, передаваемых от внешних источников на ГТС. Показано, что использование ИВО при замерзании акватории будет нарушать целостность ледового поля, снижая жесткость плиты, а также создавая узлы концентрации напряжений, тем самым уменьшая передаваемую через лед нагрузку на сооружения.

Здесь автором представлен ряд расчетных схем взаимодействия льда с ГТС при передаче усилий от судов через ледовый покров, им рассмотрены варианты взаимодействия сплошного льда и льда с ИВО как с вертикальными стенками сооружений, так и с сооружениями с наклонными поверхностями с разными углами наклона. На основании *теоретического анализа схем воздействия ледового покрова* с ИВО на вертикальные и наклонные части поверхностей сооружений автором показано, что, в зависимости от того, какое предельное состояние наступит раньше, ледовый покров с ИВО будет работать на сжатие или изгиб.

Для оценки *необходимого угла наклона* ГТС с целью создания условий для разрушения ледового покрова изгибом составлена и решена система уравнений равновесия всех основных приложенных сил, создаваемых льдом на ГТС. В расчете *условия скольжения или вращения,* с целью обеспечения полного разрушения льда изгибом, для случая острого наклона поверхности ГТС с учетом предельно допустимых границ, расчетные значения угла наклона *описываются системой уравнений* (2.1; 2.2). *Для оценки условий разрушения сечения льда,* рассмотрена плоская модель изгиба ледовой пластины, происходящего под действием моментов, созданных проекциями сил вертикальной *силы N и силы трения T.* В результате преобразований исходных уравнений системы (2.1 и 2.2) с подстановкой реальных значений коэффициента трения льда по поверхности сооружения и других данных, автором получено ***базовое уравнение*** (2.4) для горизонтального усилия *P, которое позволяет* задать минимально необходимое для начала разрушения *сплошного ледового поля изгибом* значение горизонтальной нагрузки – *как* границу перехода от разрушения льда сжатием к его разрушению изгибом при разных углах наклона стенки, в т.ч. с отрицательным наклонном.

Для выполнения сравнительных расчетов горизонтальных сил давления сплошного и перфорированного льда на сооружение по базовой формуле (2.4), далее в этой главе определены условия

скольжения и вращения фрагментов льда от разрушенного изгибом ледового поля для ***четырех случаев***: остро- и обратно- наклонных поверхностей со сплошным льдом и льдом с ИВО. При этом учитывались свойства льда, а также его геометрические параметры, приведенные к одному погонному метру длины фронта контакта. Показано, что при использовании ИВО, как способа ослабления льда, необходимо правильно учесть ряд параметров для вмораживаемых элементов, таких как их форма и размеры, статические и динамические коэффициенты трения льда о сооружение и об лед соответственно; коэффициент адгезии, а также плотность материала ИВО, определяющую его плавучесть. С введением перечисленных параметров в базовое уравнение (2.4) для расчета значений горизонтальной нагрузки на сооружение для двух случаев: от сплошного ледового покрова и от ледового покрова с включениями ИВО, для выбранного варианта наклона поверхности с учетом скольжения и вращения фрагментов льда от разрушенного изгибом ледового поля получены соответствующие этим двум случаям уравнения (2.8) и (2.11). Преобразования этих формул приводят к результатам, удобным для сравнения численных значений горизонтальной силы, воздействующей на сооружение от сплошного ледового покрова и ледового покрова с ИВО являются формулы (2.13) и в сжатом виде – (2.14).

Полученные **теоретические зависимости,** подтверждающие возможность снижения ледовой нагрузки на ГТС с помощью предлагаемой технологии, дают возможность подбора материала и размеров ИВО для снижения ледовых нагрузок на ГТС в закрытых акваториях полярных портов.

Учитывая, что для точных вычислений по формуле 2.12 необходимо решить сложную пространственную геометрическую задачу по взаимодействию «чистого» и перфорированного ледовых полей с помощью ИВО (с применением уравнения малого изгиба пластины на упругом основании с наклонными поверхностями), а также для подтверждения зависимостей (2.13, 2.14) и сформулированных выводов по результатам теоретических исследований, диссертантом принято решение об их *подтверждении экспериментальными результатами. Цели и задачи эксперимента, методика его проведения*, используемое оборудование описаны автором в ***третьей главе диссертации***. Здесь содержится описание и результаты *полевых испытаний* и исследований в *ледовом бассейне*.

В полевом эксперименте в качестве типа представительного объема ледового покрова и метода его испытания была выбрана методика испытания клавиш льда на изгиб. Для этого диссертантом была разработана методика проведения полевого эксперимента, по результатам которой на выбранном участке были изготовлены три типа клавиш льда длиной до 1,72 м:

– из «чистого» льда ледового покрова без ИВО;

– из перфорированного льда с помощью ИВО½, погруженными на половину в воду и с коэффициентом адгезии материала ИВО $kAd = 1$;

– из перфорированного льда с помощью ИВО⅔, погруженными на ⅔ в воду и с коэффициентом адгезии $k_{Ad} \rightarrow 0$;

– а также клавиши чистого льда до 7м для демонстрации излома длинной балки ***не в заделке***.

Полученные результаты полевых испытаний были проанализированы и обработаны методом наименьших квадратов и представлены в диссертации в виде графиков линейных зависимостей: изгибающего момента M_y и силы F_z от момента сопротивления сечения W_y по экспериментальным данным для клавиш из «чистого» льда и данных для клавиш из льда с ИВО½ и с ИВО⅔.

По результатам полевого экспериментального исследования диссертанту удалось получить показатели прочности обычного ледового покрова и прочности перфорированного ледового поля, которые являются основными факторами при оценке сравнительного эффекта влияния предлагаемой технологии на передаваемое на причальные сооружения внешнее усилие, созданное

ледовым полем или возникающее при передаче нагрузок. Здесь отчетливо прослеживается влияние коэффициента адгезии материала ИВО k_{Ad} на увеличение изгибной прочности ледового покрова, а именно: перфорированное поле льда с использованием ИВО½ (с $k_{Ad} = 1$) приводила к увеличению прочности льда в ≈1,55 раза и ***росту прикладываемой вертикальной силы*** в ≈3,2 раза; перфорация ледового поля с использованием ИВО⅔ (с $k_{Ad} \rightarrow 0$, т.е. без сцепления со льдом) приводила к снижению изгибной прочности ледового поля в ≈6,3 раза и ***уменьшению прикладываемой вертикальной силы*** для разрушения балки – клавиши в ≈1,5 раза.

По результатам полевого эксперимента была сформирована база для выбора расчетных коэффициентов для аналитической и численной моделей, а также получены экспериментальные данные, их ***сравнение с результатами теоретических решений показали удовлетворительную сходимость***. Полученные экспериментальные данные в дальнейшем были использованы для построения численной модели, представленной в главе 5.

Для оценки влияния уровня плотности концентрации ИВО на защищаемой акватории на значения ледовых сил на поверхности ГТС **в ледовом бассейне ААНИИ был проведен сравнительный физический эксперимент** по движению модели корпуса судна ледового класса (в масштабе 1/65) через поле чистого льда и льда с ИВО. Здесь использовались правила и методики моделирования в физическом моделировании явлений. Исследование проводилось с использованием модельных, масштабированных шариков в экспериментальной зоне ледового бассейна длиной 30 м, разделенной на четыре участка, по 5 м каждый. Количество ИВО на участках канала для второй проводки судна, например, составило A_{21} = 2386 шт. на первом участке, A_{22}=1742 на втором и A_{23}=476 шт. на третьем. Оценка распределения ИВО шарообразной формы по подходному каналу или акватории после проводки судна выполнена на основании фото- и видеоматериалов. Проводка судна через чистый лед и лед с ИВО показана в диссертации на фото на рисунке 3.11.

В четвертой главе выполнен **анализ свойств моделируемого льда** по данным из открытых источников по свойствам веществ и материалов, учитываемых при обосновании предложенной в диссертации технологии. Здесь, на основании анализа многих источников, определена схема моделирования ледового покрытия акватории с применением технологии ИВО, использована система зависимостей, описывающих основные характеристики и поведение льда, вариативно пригодные для использования в вычислительных пакетах. Далее здесь для создания математической модели автором выполнен достаточно обширный анализ параметров льда, которые определяют его основные свойства при деформировании: прочность льда на сжатие и на изгиб; плотность; модуль упругости; коэффициент Пуассона; соленость; пористость и параметры распределения температуры по толщине льда. Собранные данные по перечисленным параметрам далее будут использоваться автором в проектируемой в главе 5 расчетной модели, описывающей напряженно деформируемое состояние исследованных в полевом эксперименте клавиш льда.

Для минимизации недостоверности полученных данных автор, по аналогии с п. 7 в СП38.13330 (Нагрузки и воздействия), где рекомендуется, что для повышения точности расчетов следует принимать число слоев льда по его толщине не менее трех, принял решение, что в рамках исследования, с учетом результатов выполненного анализа открытых источников будет разрабатываться модель льда как «композитного материала», состоящего из четырех слоев. Для каждого слоя, в зависимости от его средней температуры, рассчитываются его физико – механические характеристики модельного материала.

В пятой главе представлены численные модели многослойного чистого льда и льда с ИВО, построенные для решения задачи по выбору геометрических параметров и осадки ИВО, с целью

обеспечения оптимальных условий перфорации льда для различных эксплуатационных условий, а также приведены результаты ее настройки и работы с использованием результатов полевых экспериментальных данных из главы 3. Здесь дано подробное описание используемого расчетного метода и особенности его применения для решения поставленных задач.

В основу создания численной модели в программном комплексе Abaqus FEA по изгибу консоли - клавиши льда, покоящейся на воде, была положена модель Винклера - пластины шириной 1 м на упругом основании, защемленной одним концом. Конечно-элементная сетка материала плиты и основания составлена из конечных элементов. Упругое основание задавалось набором равномерно присоединенных к поверхности клавиши нелинейных пружин, суммарная жесткость которых определяется силой Архимеда, действующей на клавишу льда и на ИВО. При построении модели были приняты соответствующие допущения, в т.ч. о том, что лед считается упругой средой и моделируется как композитный четырехслойный материал с переменной долей льда в каждом слое. Влияние ИВО на несущую способность консоли - клавиши учитывается путем уменьшения объема льда и изменения жесткости упругого основания. На свободной стороне консоли по середине ее ширины прикладывалась вертикальная нагрузка, при этом использовалась чисто упругая модель льда в каждом из 4-х слоев по толщине консоли-клавиши. Конечная толщина льда определялась по максимально возможному вмораживанию ИВО в лед.

На основе разработанной численной модели была проведена оценка влияния изменения геометрических параметров и осадки ИВО с целью поиска оптимальных вариантов. Кроме клавиши льда без ИВО («чистого» льда) были рассмотрены три варианта ИВО (с учетом погруженности шариков в воду на ½; на ⅔; на ⅞). Эта схема позволила оценить влияние значения коэффициента адгезии от 0 до 1 путем включения/выключения жестких элементов в расчетную схему для передачи растягивающих и сжимающих напряжений, возникающих во льду при изгибе. Даются рекомендации по определению параметров ИВО с учетом эксплуатационных особенностей и характеристик акваторий портов и судов.

Далее в этой главе с использованием разработанной численной модели выполнены тестовые и расчетные исследования по снижению сил излома консолей, приведено сравнение результатов ее решения с экспериментальными данными. Исследование возможности использования предлагаемой технологии снижения нагрузки, передаваемой через лед на ГТС, даны соответствующие рекомендации.

В качестве Заключения по выполненному диссертационному исследованию автор констатирует достижение цели работы в виде результатов проведенных им теоретических и экспериментальных исследований.

Достоверность и обоснованность научных положений, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации обеспечивается использованием фундаментальных законов физики, общепринятых методов механики деформируемого твердого тела и механики разрушения; использованием проверенного стандартизированного измерительного оборудования в аккредитованной лаборатории; корректным использованием результатов других авторов; выполнением обработки результатов статистическими методами; использованием сертифицированных программных комплексов для численного моделирования и верификацией математических моделей результатами экспериментов.

Новизна выводов и рекомендаций, сформулированных диссертантом.

Диссертантом, на основании данных выполненных им исследований впервые теоретически и экспериментально 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.

Практическая значимость исследования диссертантом представлена в разработке:

– новой технологии снижения ледовых нагрузок, передаваемых через лед на ГТС от внешних источников сил, которая может быть применена на закрытых акваториях портов и обеспечивать надежность и долговечность функционирования морских портов северных регионов без использования ледоколов;

– методика по использованию ИВО, с целью перфорации льда, в реальных масштабно-климатических условиях»

– численной модели в комплексе Abaqus FEA, который может быть использован для решения других задач, связанных с ГТС, с учетом погодных и технических условий;

В резюмирующей части отзыва следует отметить, что **– достоинствами диссертационного исследования** можно считать, что:

– автором на основе проведенного патентного исследования выявлена и показана патентная чистота предлагаемой им новой технологии.

– представленная диссертация - достаточно сложное и трудоемкое исследование как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. При этом ход исследования в диссертации выполнен в четкой логической последовательности, сложные понятия и определения изложены понятным языком, по ходу исследования хорошо представлены подробные схемы и приведены фотоматериалы, иллюстрирующие выполнение достаточно сложных экспериментов;

– 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.

Замечания и вопросы по диссертационной работе

В качестве замечаний по тексту диссертации необходимо отметить, что при всей грамотности и четкости изложения в нем имеют место ряд неточных формулировок, понятий и определений, например:

– в первой главе автором непонятно с какой целью приведен раздел «*1.3. Анализ технологий по усилению конструкций ГТС»* что не вписывается в тематику диссертационного исследования, также как автор ошибочно относит «*локальное усиление конструкций ГТС*» основные технологии для снижения ледовых нагрузок на ГТС;

– автором ошибочно записано, что усилия, способные повредить причальные сооружения, «возникают в процессе разрушения льда», все с точностью «наоборот»: лед разрушается в результате силовых воздействий (раздел 1.4);

– в нескольких местах текста автор употребляет некорректное терминологическое определение образования льда в акватории порта как «обледенение акватории».

– также не корректны использованные автором термины типа: «ледовое образование вокруг ГТС» или «вмерзшие в лед гидротехнические сооружения»; «тупо- наклонная поверхность» и др.

Имеется ряд неаккуратно сформулированных предложений, вызывающих «непонятности»: «плавучести приблизительно равной *плавучести льда из гидрофобного материала*» (стр. 61); «снижения прочностных характеристик льда за счет создания перфорации» (в Заключении).

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней.

Показанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Считаем, что диссертация Казунина Ивана Дмитриевича «Технология снижения ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения закрытых акваторий портов с помощью иррегулярно вмораживаемых объектов» написана им самостоятельно на основе собственных исследований, подготовлена в едином ключе, является актуальной и своевременной в научном плане работой.

Исходя из общего понимания сути работы, анализа ее содержания, конкретных ее положений, соответствующих ее содержанию текста автореферата и опубликованных по ее содержанию материалов, следует констатировать, что *научно-квалификационная работа Казунина И.Д.* написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку.

Автором диссертации совершенно правильно назначена цель работы, выбраны объект и предмет исследования, сформулированы задачи для их решения и достижения цели. Представленные им результаты исследования и рекомендации по их использованию показывают, что поставленные в работе задачи решены, ее цель достигнута.

Представленная в диссертации *методология снижения ледовых нагрузок на портовые гидротехнические сооружения в закрытых акваториях портов с использованием иррегулярно вмораживаемых объектов* ***полностью отвечает названию работы и цели исследования***. Это соответствует критериям **п.9. «Положения о порядке присуждения ученых степеней»,** утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, а именно – в диссертации автором разработаны теоретические положения, подтвержденные данными его эмпирических исследований, которые на основе полученного автором *нового научно обоснованного технологического решения и технической разработки* в совокупности можно квалифицировать как:

– ***«решение научной задачи, имеющей значение для развития отрасли знаний»*** *в области портового гидротехнического строительства в условиях Арктики,* ***имеющих существенное значение для развития страны***.

Учитывая изложенное, считаю, что диссертант ***Казунин Иван Дмитриевич*** заслуживает присуждения ему ученой степени ***кандидата технических наук*** по специальности 2.1.6 - Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология.

15.11.2025 г.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, доцент _____ Цуприк В.Г.

Цуприк Владимир Григорьевич, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Департамента морских арктических технологий Политехнического института ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» Министерства науки и высшего образования РФ. Докторская диссертация по теме «Методология определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на морские сооружения на основе энергетического подхода» защищена по специальности 05.23.07 «Гидротехническое строительство».

Адрес: 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, кампус ДВФУ, корпус А, ректорат, Тел: 8 (800) 550 38 38; Факс: 8 (423) 243 23 15; rectorat@dvfu.ru

Подпись Цуприка В.Г. ЗАВЕРЯЮ
Начальник ОКД ДВФУ _____ М.П.
(должность, ФИО)
Волынкина А.А.