

На правах рукописи



Уварова Татьяна Эриковна

**ИСТИРАЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ДРЕЙФУЮЩЕГО ЛЕДЯНОГО
ПОКРОВА НА МОРСКИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

05.23.07 – Гидротехническое строительство

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Владивосток
2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Дальневосточный федеральный университет» (ФГАОУ ВПО «ДВФУ») на кафедре гидротехники, теории зданий и сооружений

Научный консультант: Беккер Александр Тевьевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, Заслуженный работник высшей школы РФ, директор Инженерной школы ФГАОУ ВПО «ДВФУ»

Официальные оппоненты:

Козлов Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, проректору по инновационному развитию ФГБОУ ВПО РГАУ - МСХА им. К.А. Тимирязева, профессор кафедры Комплексного использования водных ресурсов и гидравлики Института природообустройства им. А.Н. Костякова;

Литонов Олегу Евгеньевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия “Крыловский государственный научный центр”;

Трусков Павел Анатольевич, доктор технических наук, начальник управления по взаимодействию с федеральными органами надзора и контроля Сахалин Энерджи Инвестмент Компании, Лтд.

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

Защита состоится « ____ » _____ 2015 г. в ____ часов на заседании объединенного диссертационного совета ДМ 512.001.01 при Открытом акционерном обществе "Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева" (ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева») по адресу 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21.

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

Автореферат разослан

« ____ » _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

Т.В. Иванова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования определяется необходимостью освоения запасов углеводородного сырья на шельфе Мирового океана вследствие постепенного истощения месторождений на суше и ростом потребности промышленности в энергоресурсах. В свою очередь, освоение месторождений нефти и газа на континентальном шельфе ледовитых морей является важнейшей народно-хозяйственной проблемой, определяющей развитие топливно-энергетического комплекса России.

Значительная часть шельфа России располагается в холодных арктических и дальневосточных морях, которые характеризуются суровыми климатическими условиями и наличием дрейфующего ледяного покрова. В этих условиях основным фактором, влияющим на надежность морских ледостойких платформ (МЛП), является ледовый режим акватории в районе строительства и, как следствие, ледовые нагрузки и воздействия на сооружение. Одним из таких воздействий в акваториях с динамичным режимом дрейфа ледяного покрова является истирающее воздействие льда (абразия).

Объектом исследований является процесс взаимодействия ледяных образований с поверхностью корпуса гидротехнических сооружений в зоне переменного уровня моря. При движении ледяных образований относительно сооружения происходит эрозия поверхности и абразивное разрушение материала корпуса. Причина разрушения поверхности железобетонных конструкций от абразивного воздействия ледяных образований связана с возникновением значительных пульсирующих давлений в зоне контакта бетона с дрейфующим ледяным покровом.

В этом случае кристаллы льда являются хорошим абразивом, что способствует постепенному уменьшению сечения сооружения. Вследствие высоких контактных давлений происходит разрушение цементного камня, что приводит к увеличению пористости, потере заполнителя и уменьшению прочности бетона, а действие окружающей среды, обусловленное циклами замораживания-оттаивания, способствует постепенному ослаблению вяжущих и заполнителей поверхностного слоя и приводит к его разрушению. Под термином ледовая абразия следует понимать разрушение материала конструкции в опасной зоне истирания в процессе взаимодействия дрейфующих ледяных образований с сооружением, что является *предметом исследования*.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время проблема оценки истирающих воздействий от дрейфующего ледяного покрова на морские гидротехнические сооружения остается открытой, что обусловлено следующими причинами: многообразием и сложностью процессов разрушения ледяных образований при взаимодействии с сооружением; большим разбросом физико-механических характеристик льда; недостаточным объемом натуральных данных, как по ледовой нагрузке, так

и по ледовой абразии; несогласованностью экспериментальных исследований на сопротивление материалов ледовой абразии и, как следствие, отсутствием в нормативной литературе требований, предъявляемых к износостойкости материала (бетон, металл, покрытия), подверженного ледовой абразии, и рекомендаций по формированию ледовых нагрузок с учетом истирающего воздействия льда.

В условиях отсутствия достаточного опыта эксплуатации МЛП в морях с высокой динамичностью ледяного покрова бетонные основания гравитационного типа для Лунского и Пильтун-Астохского месторождений шельфа о. Сахалин были оборудованы специальными стальными ледозащитными приспособлениями в зоне действия ледовой нагрузки. Их основная функция – защитить бетон от истирающего воздействия ледяного покрова. Однако не все ледозащитные приспособления могут противостоять ледовым воздействиям в условиях высокой динамики дрейфа ледяного покрова, максимальной изменчивости его морфометрических параметров и прочностных свойств. Все эти факторы способствовали разрушению ледозащитных приспособлений, установленных на платформе ПА-А и на платформе ПА-Б Пильтун-Астохского месторождения на шельфе о. Сахалин, при этом возникает необходимость разработки научных основ расчетного обоснования проектных решений ледозащитных приспособлений МЛП.

Цель и основные задачи исследования. Цель диссертационной работы – обеспечение надежности и безопасной эксплуатации морских гидротехнических сооружений (МГТС) путем разработки методик расчета параметров ледовых истирающих воздействий и глубины ледовой абразии.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие основные задачи, для чего используется комплексный подход к методам решения проблемы расчета ледовой абразии и разработаны:

- математические модели процессов формирования параметров ледовых истирающих воздействий от различных видов ледяных образований;
- методика планово-высотного распределения ледовых воздействий в опасной зоне истирания;
- способ оценки сопротивления материала ледовой абразии;
- план проведения экспериментов, условие и порядок проведения лабораторных испытаний на сопротивление материалов ледовым истирающим воздействиям;
- математическая модель и методика расчета глубины ледовой абразии;
- схема верификации математических моделей формирования параметров ледовых истирающих воздействий и эмпирических моделей сопротивления материала ледовой абразии.

Научную новизну работы составляют комплекс математических моделей и расчетных программ по изучению истирающего воздействия ледяного покрова, на основании которого определены закономерности изменения ледовых истирающих воздействий. В диссертационной работе адаптированы основные положения СП 38.13330.2012 по определению ледовых нагрузок к расчету параметров ледовых истирающих воздействий на морские гидротехнические сооружения и разработаны:

- концептуальная модель ледовой абразии;
- математические модели процессов формирования параметров ледовых истирающих воздействий от различных видов ледяных образований;
- математическая модель расчета глубины ледовой абразии;
- методика планово-высотного распределения ледовых воздействий в опасной зоне истирания, реализованная в виде программы для графической интерпретации результатов расчета «Construction 3D»;
- способ оценки сопротивления материала ледовой абразии, условия и порядок проведения лабораторных испытаний;
- эмпирические модели интенсивности ледовой абразии бетона;
- методика расчета глубины ледовой абразии, реализованная в виде расчетно-программного комплекса «IceStrIn» (Ice Structure Interaction).

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложен комплекс математических моделей и расчетных программ по формированию ледовых истирающих воздействий и определению глубины ледовой абразии с учетом планово-высотного распределения ледовых воздействий в опасной зоне истирания. Методика расчета глубины ледовой абразии позволила адаптировать основные положения СП 38.13330.2012 по определению ледовых нагрузок к расчету параметров ледовых истирающих воздействий на морские гидротехнические сооружения. Результаты исследований могут быть использованы для дополнения нормативных документов по расчету морских гидротехнических сооружений на истирающее воздействие дрейфующего ледяного покрова и для проведения лабораторных испытаний различных строительных материалов на сопротивление ледовой абразии.

Результаты работы использовались при проектировании ледозащитного пояса из износостойкого бетона для бетонного основания гравитационного типа (БОГТ) «Беркут» месторождения Аркутун-Даги, построенного в рамках проекта «Сахалин-1».

Рекомендации по проектированию ледозащитного пояса даны на основе проведенных исследований с изготовлением опытного образца в натуральную величину (рис. 1, а), что позволило отработать технологию изготовления опорных колонн БОГТ и применить ее на практике.

Проект ледозащитного пояса из износостойкого бетона, выполненный на основе расчетных данных о глубине ледовой абразии по разработанной автором методике расчета, был внедрен при строительстве БОГТ «Беркут» (рис. 1, б).



Рис. 1. Ледозащитные приспособления БОГТ «Беркут» месторождения Аркутун-Даги: а – опытный образец бетонного ледозащитного пояса; б – бетонный ледозащитный пояс

Разработанная методика расчета глубины ледовой абразии применима для гравитационных оснований вертикального типа, эксплуатируемых в суровых ледовых условиях, и опор многоопорных сооружений, работающих независимо друг от друга при взаимодействии с дрейфующим ледяным покровом.

Методы исследования. В диссертации проведен комплекс исследований, включающий методы математического моделирования и базовые экспериментальные исследования сопротивления строительных материалов ледовым истирающим воздействиям. Учитывая сложность рассматриваемых систем, применялись методы имитационного моделирования.

Верификация математических моделей ледовых истирающих воздействий и эмпирических моделей интенсивности ледовой абразии выполнена на основе натуральных измерений глубины ледовой абразии поверхности бетонных оснований финских маяков и представительных данных натуральных наблюдений за ледовым режимом Балтийского моря.

Экспериментальные исследования и численное моделирование выполнено с учетом теории планирования экспериментов. Эмпирические модели сопротивления материала ледовой абразии базируются на результатах обработки данных лабораторных испытаний. При обработке экспериментальных данных и данных численного моделирования использовались методы теории вероятности и математической статистики.

Положения, выносимые на защиту. Комплексный подход к методам решения проблемы ледовой абразии, состоящий из следующих положений:

- математические модели процессов формирования параметров ледовых истирающих воздействий на сооружение;
- методика планово-высотного распределения ледовых воздействий в опасной зоне истирания;

– способ оценки сопротивления материала ледовой абразии, условия и порядок проведения лабораторных испытаний;

– эмпирические модели интенсивности ледовой абразии бетона;

– методика расчета глубины ледовой абразии.

Степень достоверности результатов подтверждена удовлетворительной схожимостью результатов расчетов глубины ледовой абразии с данными натурных наблюдений; проведением спланированного полнофакторного эксперимента; статистической достоверностью формулируемых положений, на основе которых выполнено построение эмпирических моделей сопротивления бетона ледовой абразии; использованием статистически представительных выборок натурных наблюдений за ледовым режимом и глубиной ледовой абразии.

Апробация результатов исследования. Основные положения исследований докладывались и обсуждались на «International Offshore and Polar Engineering Conference» (ISOPE) в 2001, 2003–2005, 2009–2013 гг.; ISOPE (PACOMS) в 2004, 2010 гг.; «Asian and Pacific Coastal Engineering Conference» в 2001 г.; «International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice» (Mombetsu) в 2003, 2008 гг.; «Workshop on Ice abrasion concrete structures» в 2007 г.; «International Association of Hydraulic Engineering and Research» International Symposium on Ice (IAHR) в 2008, 2012, 2014 гг.; International Conference on «Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions» (POAC) в 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013 гг.; International Congress on Durability of Concrete (ICDC) в 2012 г.; Международной научно-практической конференции-выставке «Тихоокеанский шельф» / «Pacific Offshore Conference» (POC) в 2005, 2012 гг.; Международной конференции «Стихия. Строительство. Безопасность» в 2008 г.; Международной конференции «Российский арктический шельф» в 2011 г., на ежегодных конференциях «Вологдинские чтения»; ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ДВФУ.

Личный вклад автора. Лично автором выполнен аналитический обзор научных достижений в области ледовой абразии. Выявлены основные закономерности изменения интенсивности ледовой абразии, выполнена постановка задачи по математическому описанию процессов формирования, ледовых истирающих воздействий. Совместно с научным консультантом предложен концептуальный подход к решению проблемы расчета глубины ледовой абразии. Автором разработаны математические модели формирования параметров ледовых истирающих воздействий от различных типов ледяных образований, математическая модель и алгоритм расчета глубины ледовой абразии, методика планово-высотного распределения ледовых воздействий в опасной зоне истирания. Автор участвовала в создании методики проведения экспериментальных исследований. Автором определены условия проведения лабораторных испытаний, разработан план экспериментальных исследований, назначен порядок

подготовки образцов бетона к лабораторным испытаниям и порядок проведения экспериментальных испытаний. Автором разработаны методика расчета глубины ледовой абразии, реализованная в виде расчетно-программного комплекса «IceStrIn», и даны рекомендации по их использованию. Выполнена прямая и косвенная верификация методики расчета. Автор участвовала в научных экспериментах, обработке экспериментальных данных, анализе и интерпретации результатов расчета, апробации результатов исследования, подготовке основных публикаций по теме выполненной работы. В отдельных исследованиях под руководством профессора А.Т. Беккера принимали участие доцент Ким Л.В., аспирант Анохин П.Г., магистрант Помников Е.Е.

Публикации. Материалы диссертации полностью отражены в 53 опубликованных работах, в том числе 17 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 15 в изданиях, индексируемых базой Scopus, 1 монография и 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ (в соавторстве), выпущено более 40 научно-технических отчетов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованных источников и 6 приложений. Она содержит 271 страницу текста, 141 рисунок, 24 таблицы, список литературы из 204 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи и новизна полученных результатов, приведена реализация и апробация работы. Приведен краткий критический анализ состояния рассматриваемой проблемы.

В первой главе выполнен аналитический обзор исследований истирающего воздействия ледяного покрова на гидротехнические сооружения.

Проблемой оценки ледовых воздействий на МГТС в настоящее время заняты многие зарубежные научные центры и ряд научных коллективов в нашей стране (рис. 2). В большинстве исследований ледовой абразии оценивается влияние ледового режима на процесс истирания и влияние физико-механических свойств материала (бетон, металл и покрытия) на величину ледовой абразии.

Ледовая абразия конструкций морских инженерных сооружений оказывает значительное влияние на их надежность, учитывая, что степень абразии бетона может достигать $0,9 \div 1,6$ мм/год – по наблюдениям S. Huovinen; $0,2 \div 11,6$ мм/год – по исследованиям J. Janson на маяках в Балтийском море; $1,0 \div 5,0$ мм/год – по наблюдениям F. Nara.

В серии монографий С.А. Вершинина с соавторами обобщены исследования в области ледовых воздействий, трения льда, истирания льдом конструкционных материалов и сделана попытка применить весь этот комплекс исследований к решению проблемы оптимального проектирования ледостойких сооружений и задачи истирающего воздействия льда на сооружения шельфа.

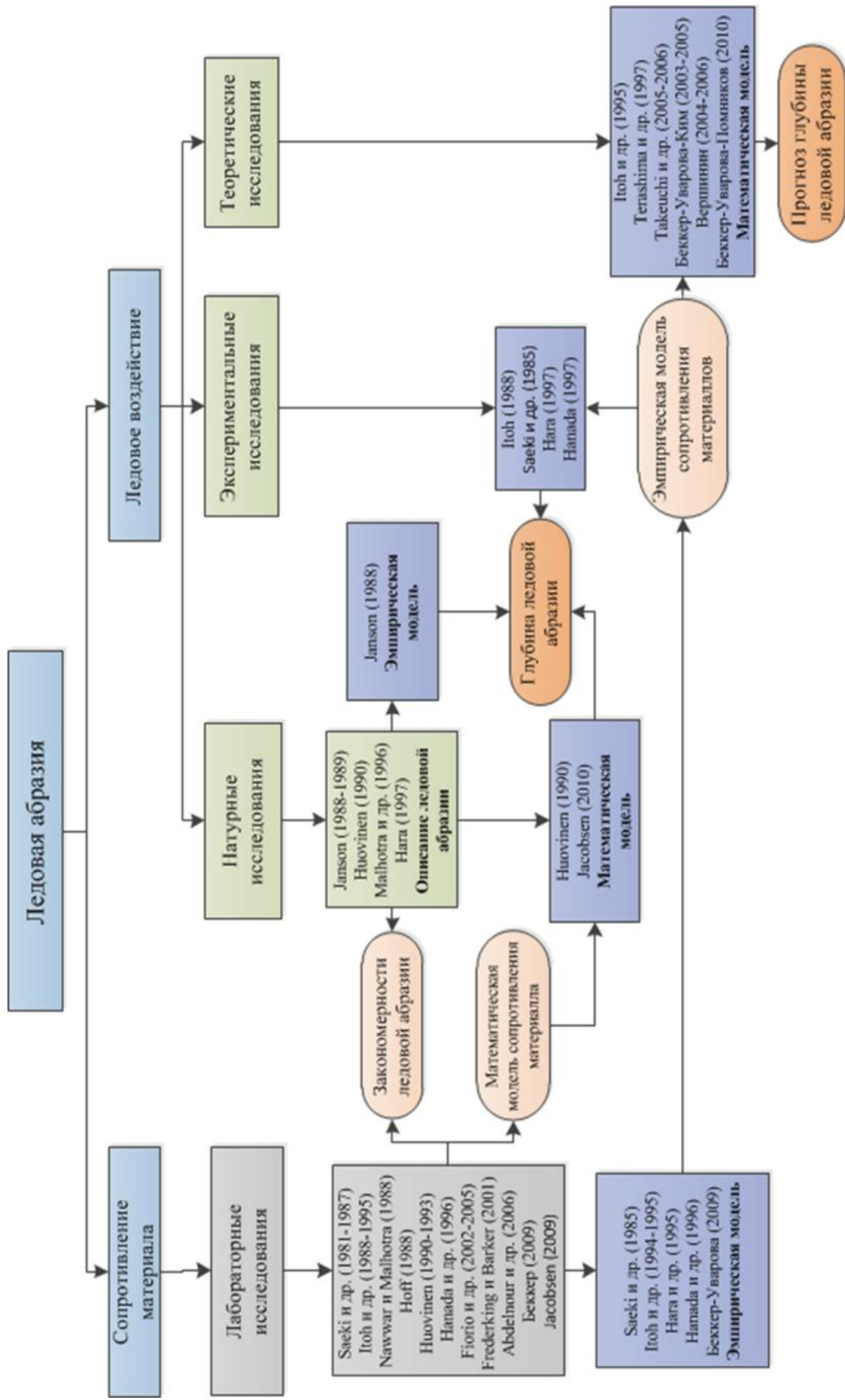


Рис. 2. Основные научные исследования в области ледовой абразии

На основании научных исследований в области ледовой абразии предложенные модели сопротивления материала ледовым истирающим воздействиям можно разделить на два типа:

– теоретические модели, которые основаны на математических моделях сопротивления бетона ледовой абразии (S. Huovinen и S. Jacobsen);

– экспериментальные модели, которые основаны на статистической обработке данных лабораторных испытаний на сопротивление материалов ледовой абразии, и направлены на выявление эмпирических зависимостей интенсивности ледовой абразии (H. Saeki с соавторами, J. Janson, Y. Itoh с соавторами, F. Nara с соавторами, M. Hanada с соавторами).

Используя модели сопротивления строительных материалов ледовым истирающим воздействиям, ряд авторов разработали математические модели расчета глубины ледовой абразии материала дрейфующим льдом (Y. Itoh с соавторами, T. Terashima с соавторами, T. Takeuchi с соавторами, А.Т. Беккер с соавторами, С.А. Вершинин с соавторами).

Математические модели ледовой абразии бетона S. Huovinen и S. Jacobsen направлены на минимизацию использования лабораторных испытаний. Однако, процесс абразии бетона, металла и других строительных материалов дрейфующим льдом на современном этапе изучен недостаточно, поэтому математические модели ледовой абразии S. Huovinen и S. Jacobsen требуют дальнейших исследований и верификации и не могут использоваться в проектной практике напрямую.

Экспериментальные модели сопротивления материала ледовым истирающим воздействиям не дают возможности напрямую рассчитать глубину ледовой абразии. Для оценки глубины ледовой абразии необходимо решение проблемы воздействия льда на сооружение, в зависимости от ледового режима акватории и геометрии сооружения.

На основе анализа современного состояния проблемы в области истирающего воздействия ледяного покрова на МГТС во всех предложенных моделях расчета глубины ледовой абразии в полной мере не решена проблема определения ледовых истирающих воздействий, не решен вопрос количественной оценки длины пути истирания, относительной скорости взаимодействия и контактного давления льда. Кроме того, в исследованиях по ледовой абразии не рассматривается комплексный подход к оценке глубины ледовой абразии, где совместно решается задача ледовых истирающих воздействий и сопротивления материалов ледовой абразии. Комплексный подход был реализован в предлагаемой автором концепции и методике расчета глубины ледовой абразии.

Во второй главе дана краткая историческая справка освоения месторождений на шельфе о. Сахалин, выполнена постановка задачи и предложен комплексный подход к расчету глубины ледовой абразии.

Краткая историческая справка. Промышленная добыча углеводородов на Дальнем Востоке началась на наиболее подготовленных к эксплуатации месторождениях шельфа о. Сахалин (проекты «Сахалин-1» и «Сахалин-2»). В рамках проекта «Сахалин-1» осваивает-

ся три морских месторождения (Чайво, Одопту и Аркутун-Даги). Для освоения месторождения Чайво задействованы буровые сооружения как береговые (буровая установка «Ястреб»), так и морские (платформа «Орлан»). Для освоения месторождения Аркутун-Даги построена платформа «Беркут». По проекту «Сахалин-2» осваивается Пильтун-Астохского нефтяного и Лунского газового месторождения. В рамках проекта «Сахалин-2» установлены платформы «Моликпак» (ПА-А), «Лунская-А» (ЛУН-А) и «Пильтун-Астохская Б» (ПА-Б).

Этапы проектирования и строительства БОГТ платформы «Беркут». В 2008 - 2009 годах по заказу компании «Еххон Neftegas Limited» специалисты ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» (ВНИИГ) и ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова» (ЦНИИ им. Крылова) совместно с генеральным проектировщиком - компанией «Aker Solution» участвовали в проектировании платформы «Беркут».

В 2009 – 2010 специалисты ДВФУ совместно с сотрудниками ледовой лаборатории ООО «НПО «Гидротекс» и специалисты Норвежского университета науки и технологий (NTNU) по заказу компании «Aker Solution» выполнили экспериментальные исследования различных составов бетона на сопротивление ледовой абразии. Результаты работы использовались при проектировании ледозащитного пояса из износостойкого бетона для БОГТ «Беркут», построенного в рамках проекта «Сахалин-1».

БОГТ «Беркут» было построено на производственных мощностях Завода морских конструкций «VOSTKO Yard» в п. Врангель, Приморский край в период с 2010 по 2012 гг.

С марта 2010 по 2012 год ВНИИГ под руководством д.т.н., профессора М.Е. Мирнова осуществлял авторский надзор за изготовлением и строительством БОГТ платформы «Беркут». Летом 2012 года БОГТ платформы «Беркут» было выведено из дока в п. Восточный, Приморский край и установлено на месторождении Аркутун-Даги.

Комплексный подход к методам решения проблемы расчета ледовой абразии. Проблема ледовой абразии ОГТ может быть разделена на две части: проблема сопротивления материала конструкции истирающему воздействию льда и проблема ледовых воздействий, вызывающих абразию.

Концептуальная модель расчета абразии представлена на рис. 3.

Ледовая абразия			
Воздействие на сооружение		Сопротивление материала	
Экспериментальные исследования	Теоретические исследования	Экспериментальные исследования	Теоретические исследования

Рис. 3. Концептуальная модель расчета ледовой абразии

Проблема сопротивления материала ледовой абразии решается путем проведения *экспериментальных исследований* различных материалов, на основе которых определяется эмпирическая зависимость интенсивности ледовой абразии от основных параметров, вы-

зывающих абразию материала (контактное давление, температура льда, длина пути взаимодействия). Эмпирическая модель ледовой абразии уникальна для каждого испытуемого материала (с соответствующими ему физико-механическими свойствами), характеризует способность материала сопротивляться ледовым истирающим воздействиям и отражает физические процессы при истирании материала льдом.

Для решения проблемы ледовых воздействий, вызывающих абразию, разрабатывается математический аппарат расчета параметров ледовых истирающих воздействий и глубины ледовой абразии (*теоретические исследования*).

Таким образом, совместное использование теоретических моделей формирования параметров ледовых истирающих воздействий и эмпирической модели интенсивности ледовой абразии позволяет создать *методику расчета глубины ледовой абразии*.

Постановка задачи. Абразивный износ бетона конструкции в зоне переменного уровня от действия дрейфующего ледяного покрова вызывает опасность оголения арматуры и ее ускоренную коррозию в морской среде, потерю толщины и прочности конструктивных элементов. При этом дефекты бетона, вызванные химической агрессией воды и попеременными циклами замораживания-оттаивания, усиливаются истирающим воздействием ледяного покрова в результате его дрейфа под действием течений, ветра и колебаний уровня моря. Плотность бетона при этом снижается и увеличивается пористость, что, соответственно, уменьшает сопротивляемость циклам замораживания–оттаивания.

Высокая динамика ледяного покрова на северо-восточном побережье о. Сахалин способствует разрушению опор МЛП от истирающего воздействия льда за планируемый период их эксплуатации. Таким образом, для создания условий безопасной эксплуатации МЛП от ледовых истирающих воздействий необходимо знать максимальную глубину ледовой абразии за весь срок их эксплуатации, что позволит обосновать толщину ледозащитного приспособления и принять решение по его конструкции.

В соответствии с предложенной концептуальной моделью расчета глубины ледовой абразии исследование носит комплексный характер, предусматривает выполнение экспериментальных, расчетно-теоретических работ и состоит из следующих этапов.

Экспериментальные исследования строительных материалов на сопротивление ледовым истирающим воздействиям, получение эмпирической модели интенсивности ледовой абразии и обоснование выбора материала ледозащитного элемента.

Сбор исходных данных по гидрометеорологическим условиям района строительства, данных по конструкции сооружения и привязка к месту установки, определение размеров зоны, подверженной ледовой абразии.

Теоретические исследования - численное моделирование ледовых истирающих воздействий, выполняемое на основе разработанных автором математических моделей формирования параметров ледовых истирающих воздействий и модели расчета глубины ле-

довой абразии, в которой используется полученная на I-ом этапе эмпирическая модель интенсивности ледовой абразии.

В результате численного моделирования определяются расчетные параметры ледовых истирающих воздействий (длина пути взаимодействия, давление на контакте "лед-сооружение" и т.д.) и глубина ледовой абразии за весь срок службы сооружения.

В третьей главе даны рекомендации для проведения экспериментальных исследований на сопротивления строительных материалов ледовым истирающим воздействиям, приведены результаты испытаний, на основе которых получены эмпирические модели интенсивности ледовой абразии для бетона с финских маяков, установленных в Ботническом заливе Балтийского моря.

Экспериментальные исследования проводились на специально разработанной установке на базе ледовой лаборатории компании ООО «НПО «Гидротекс» под руководством профессора А.Т. Беккера. Общий вид установки показан на рис. 4, технические характеристики установки приведены в табл. 1.

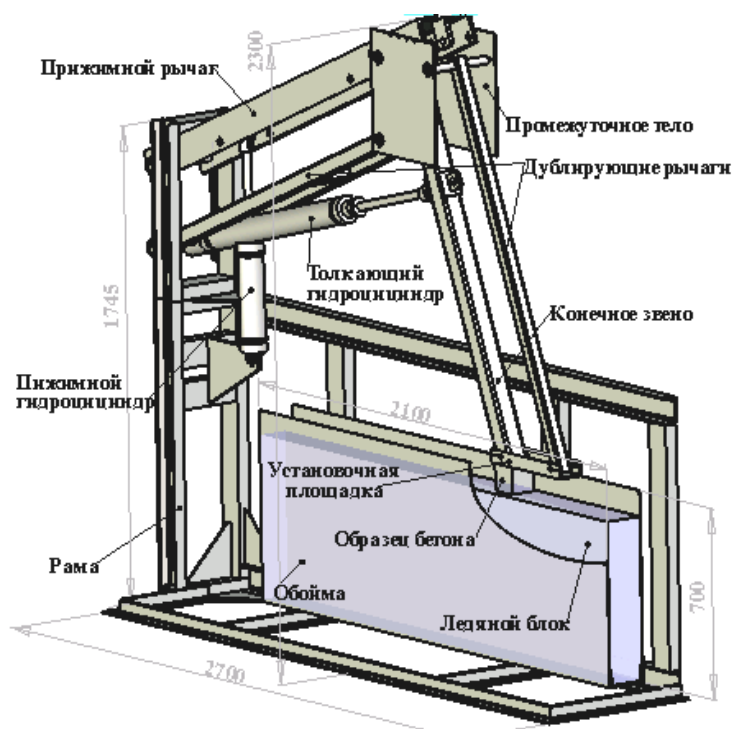


Таблица 1
Технические характеристики
установки для исследования
ледовой абразии

Амплитуда горизонтального перемещения	до 2000 мм
Амплитуда вертикального перемещения	700 мм
Скорость горизонтального перемещения	0,2÷1,02 м/с
Скорость вертикального перемещен	1,0÷5,0 мм/с
Усилие прижима образца	1,0÷10,0 кН

Рис. 4. Установка для испытаний на ледовую абразию

Для приготовления блоков льда со свойствами, максимально близкими к свойствам натурального морского льда была сконструирована система приготовления льда.

Глубина истирания поверхности образца определялась с помощью измерительной установки в 168 точках два раза – до испытаний и после.

Основными параметрами, контролируемые в процессе испытаний на абразию, являются: контактное давление, температура льда и воздуха, путь истирания, глубина истирания.

Проведение лабораторных испытаний состоит из следующих этапов:

- разработка плана эксперимента;
- проведение испытаний образцов бетона на морозостойкость;
- подготовка образцов бетона к испытаниям;
- проведение испытаний на сопротивление материала ледовой абразии;
- статистическая обработка результатов испытаний, получение эмпирической модели интенсивности ледовой абразии;

– анализ результатов и рекомендации по выбору строительного материала.

Для проведения испытаний были получены образцы бетона с финских маяков: Oulu2 (39–73 МПа); Oulu3 (46–80 МПа); Raahе (35–65 МПа) (первая цифра это прочность образцов бетона ниже ватерлинии, вторая – прочность образцов бетона на 1,5 м выше уровня воды). По результатам измерений глубины ледовой абразии строилась поверхность истертой грани образца при помощи программы SURFER (рис. 5а, б). В результате лабораторных испытаний для каждого маяка получены эмпирические модели интенсивности ледовой абразии для характерной области истирания размером 20×30 мм (рис. 5в). Эмпирическая модель интенсивности ледовой абразии от температуры льда и контактного давления для маяка Raahе приведена на рис. 6.

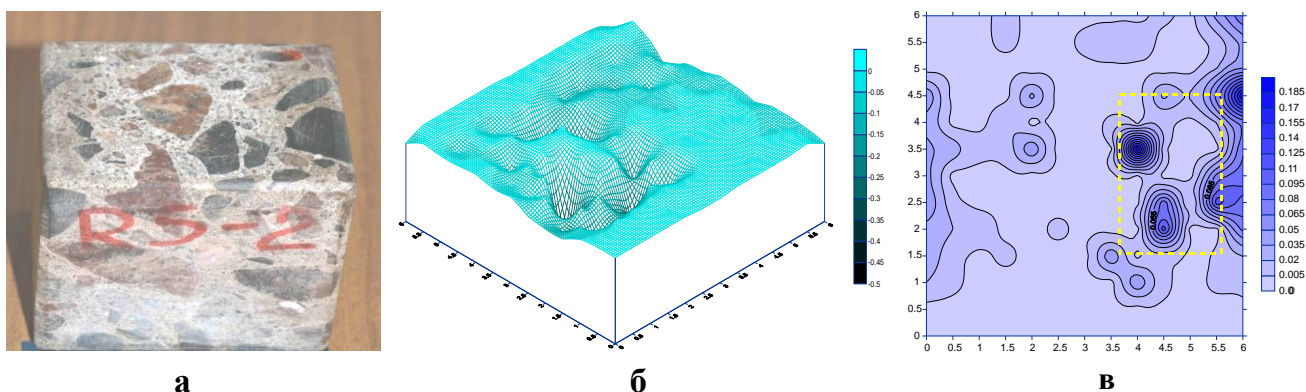
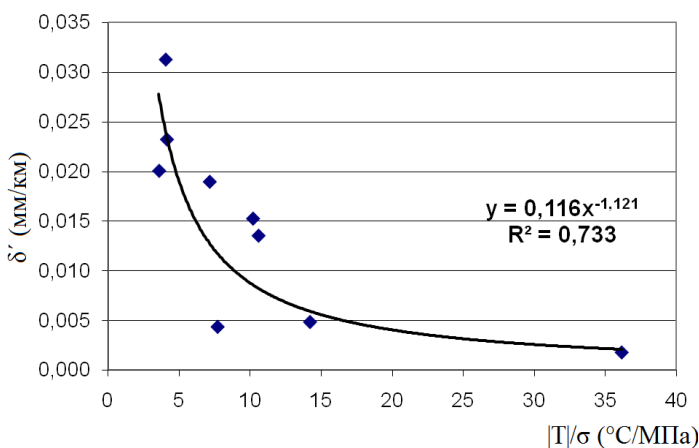


Рис. 5. Образец бетона после испытаний на ледовую абразию (а), компьютерная визуализация поверхности образца после испытаний (б), характерная область истирания (в)



Маяк Raahе

$$\delta'_{aver} = 0,116 \left(\frac{|T|}{\sigma} \right)^{-1,121}$$

Рис.6. Эмпирическая модель интенсивности ледовой абразии в зависимости от температуры льда и контактного давления

Оценка погрешности расчетных параметров интенсивности ледовой абразии выполнялась с доверительной вероятностью $\alpha=95\%$., при этом абсолютная ошибка интенсивности ледовой абразии составила $\pm 0,0026$ мм/км.

Эмпирическая модель интенсивности ледовой абразии должна определяться отдельно для каждого материала с заданными физико-механическими свойствами путем проведения лабораторных испытаний.

В четвертой главе предлагается методика расчета глубины ледовой абразии, основанная на совместном использовании эмпирической модели интенсивности ледовой абразии и вероятностной имитационной модели формирования ледовых воздействий на МГТС.

Общая вероятностная имитационная модель формирования ледовых воздействий на МГТС основана на численном формировании функции распределения параметров ледового режима и имитации всех возможных ситуаций, характеризующихся случайным сочетанием значений входных параметров. В рамках вероятностной имитационной модели для каждой ситуации выполняется расчет параметров ледовых истирающих воздействий, для чего используются математические модели процесса механического взаимодействия ледяных образований с МЛП. В результате численного моделирования и имитации всех расчетных ситуаций за весь период эксплуатации сооружения определяются характеристики ледовой нагрузки, контактного давления и длина пути истирания.

При разработке модели были приняты следующие *допущения*, которые соответствуют современному уровню знаний о ледовых воздействиях на инженерные сооружения.

1. Ледяной покров представляет собой совокупность ледяных образований, равномерно распределенных по площади акватории, характеризующихся следующими параметрами: толщиной h , скоростью дрейфа по направлениям V , диаметром D , температурой T , сплоченностью N .

2. Параметры ледяного покрова являются независимыми случайными величинами и представлены в виде помесечных гистограмм распределения, построенных на основе многолетних рядов наблюдений в заданном районе морских акваторий.

3. Вероятность k -ой расчетной ситуации с определенным сочетанием исходных параметров ледового режима определяется по формуле:

$$P_s = P(V_k) \cdot P(D_k) \cdot P(h_k) \cdot P(T_k) \cdot P(N_k) \cdot P(Z_k) \cdot \quad (1)$$

где $P(V_k)$, $P(D_k)$, $P(h_k)$, $P(T_k)$, $P(N_k)$, $P(Z_k)$ – вероятности исходных параметров в k -ой расчетной ситуации соответственно скорости дрейфа льда, размеров ледяных образований, толщины, температуры и сплоченности льда, колебания уровня моря.

4. Начальное расстояние между ледяными образованиями определяется следующим образом:

$$L_0 = \sqrt{D_k^2 \cdot 10 / N_k} - D_k, \quad (2)$$

где N_k – сплоченность ледяного покрова, D_k – диаметр ледяного образования.

5. Вероятность столкновения ледяного образования с сооружением в k -ой расчетной ситуации определяется по формуле:

$$P_c = \frac{N_k}{10 \cdot D_k^2} (D_k + d) \cdot (L_0 + d), \quad (3)$$

где d – диаметр сооружения.

6. Область рассматриваемых ситуаций ледового режима для расчета ледовой абразии ограничена следующими пределами: толщина льда $h > 0,3$ м; сплоченность льда $N > 6$ баллов.

7. На процесс истирания материала поверхности сооружения ледяным покровом влияют различные формы ледяных образований. Выделяются три основные группы возможных воздействий от движущихся ледяных образований на отдельно стоящие опоры в зависимости от их размеров:

- нагрузка от *битого льда* с размером ледяных образований $D_k \leq 4d$;
- нагрузка от *обломков ледяных полей* размерами $4d < D_k \leq 500$ м;
- нагрузка от *ледяных полей* размером $D_k > 500$ м.

8. Нагрузка от торосистых образований в расчетах не рассматривается.

Изменчивость температуры и прочности по толщине ледяного покрова определяется при стационарном режиме на основе разработанного для этих целей алгоритма и программы расчета (Прочность льда). Методика определения прочности льда по СП 38.13330.2012 с учетом влияния температуры воздуха и структуры ледяного покрова позволяет реализовать следующий алгоритм расчета. Для заданной толщины ледяного образования h определяется расчетная дата температуры воздуха до момента воздействия льда на сооружение данной толщины. По расчетной дате принимается гистограмма температуры воздуха. Прочность i -го слоя льда C_i назначается в соответствии с рекомендациями СП 38.13330.2012 в зависимости от типа кристаллической структуры морского льда и температуры i -го слоя льда T_i . Общая прочность ледяного образования R_c определяется путем послойного суммирования расчетных прочностей i -х слоев ледяного покрова в соответствии с СП 38.13330.2012, что позволяет учесть структуру ледяного образования и влияние температуры льда на прочностные характеристики ледяного покрова.

Для решения задачи расчета глубины ледовой абразии разработаны следующие математические модели:

- формирования параметров ледовых истирающих воздействий от различных видов ледяных образований;
- определения глубины ледовой абразии
- плано-высотного распределения ледовых воздействий.

Блок-схема расчета приведена на рис. 7.

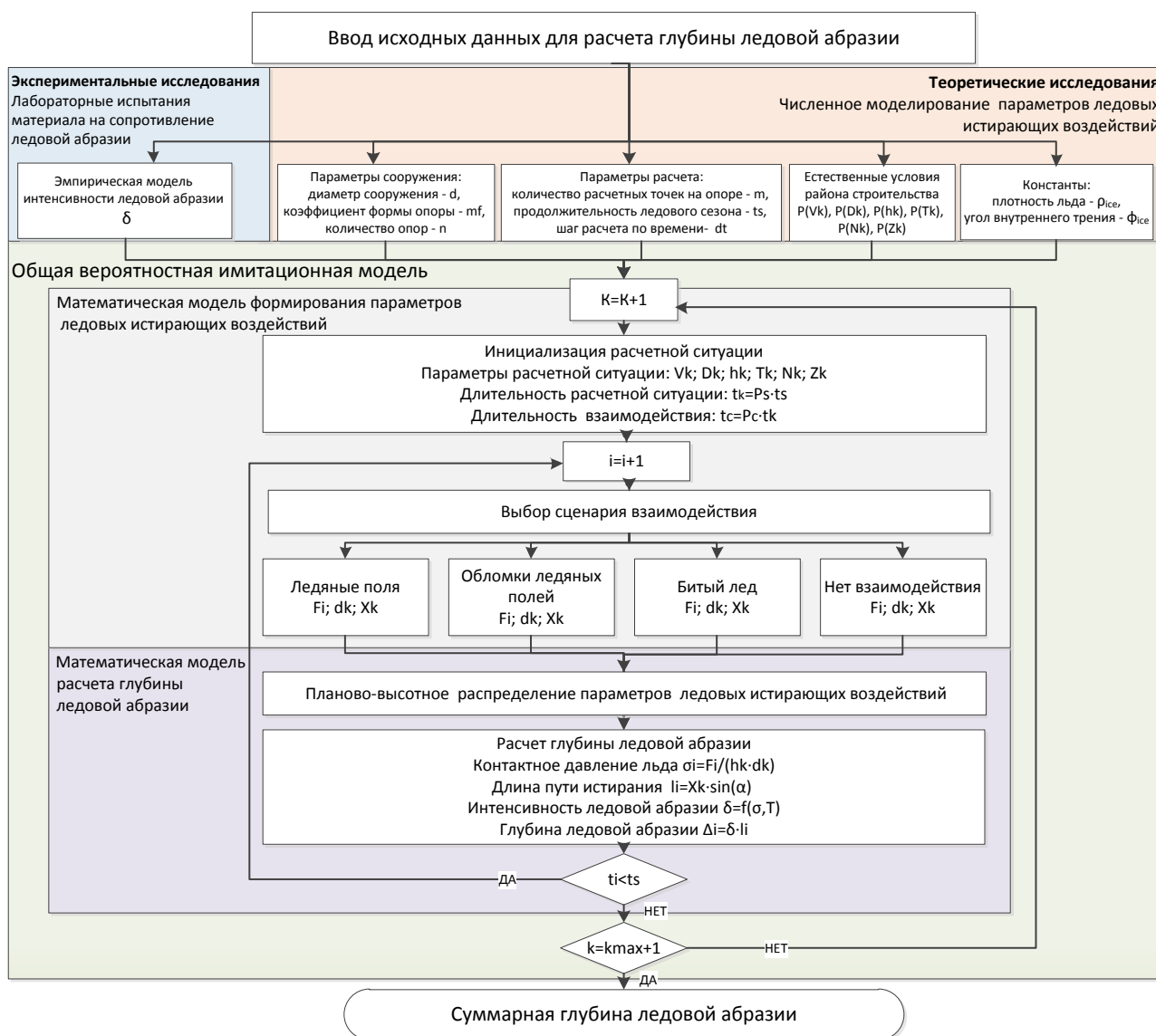


Рис. 7. Блок-схема расчета

Математическая модель формирования параметров ледовых истирающих воздействий от ледяных полей. Значение ледовой нагрузки при внедрении и остановке ледяных полей определяется в соответствии с рекомендациями СП 38.13330.2012. Сила от воздействия движущегося ледяного поля на сооружение, состоящее из системы вертикальных колонн, определяется согласно СП 38.13330.2012.

Основную трудность в расчете представляет определение времени и длины пути взаимодействия ледяного поля с сооружением. Для реализации этой задачи, используется закон сохранения импульса и теорема об изменении кинетической энергии ледяного поля. В данном случае рассматривается центральный полностью неупругий удар, где вся кинетическая энергия льдины приравнивается к работе контактной силы на пути внедрения опоры в ледяное поле. Согласно закону сохранения энергии, зависимость изменения скорости внедрения льда с учетом силы течения можно записать в виде

$$V_{i+1} = \sqrt{\frac{M_i V_i^2 + 2(F_i - F_w) \cdot V_i \cdot dt}{M_{i+1}}}, \quad (4)$$

где V_{i+1} – скорость льдины на следующем шаге, м/с; V_i – скорость льдины на i -м шаге, м/с; M_i – масса льдины на i -м шаге, кг; M_{i+1} – масса льдины на следующем шаге, кг; F_i – ледовая сила, МН; F_w – сила трения от течения, МН.

Процесс внедрения может возобновиться при передаче импульса подошедшей льдины к блоку льда, стоящему перед сооружением. Согласно закону сохранения импульса, скорость блока льда определится из соотношения

$$V_{i+1} = \frac{M_i V_i + M_0 V_k}{M_i + M_0}, \quad (5)$$

где M_0 – начальная масса ледяного поля, кг; V_k – скорость дрейфа льда, м/с.

Длина пути взаимодействия:

$$X_i = \sum dx_i = \sum (V_i \cdot dt), \quad (6)$$

где dx_i – длина пути взаимодействия ледяного поля с опорой сооружения на i -м шаге расчета; dt – шаг моделирования по времени, с.

Ширина зоны контакта для ледяных полей принимается равной диаметру опоры: $d_{rb} = d$, тогда длина зоны контакта принимается равной длине дуги – $d_k = \pi d / 2$.

Математическая модель формирования параметров ледовых истирающих воздействий от обломков ледяных полей. Предполагается, что кинетической энергии ледяного образования достаточно для внедрения опоры в лед, тогда ледовая нагрузка определяется как сила от воздействия движущегося ледяного поля на сооружение, состоящее из системы вертикальных колонн, при этом ширина зоны контакта принимается равной $d_{rb} = d / 4$. Длина зоны контакта определится как длина дуги по формуле $d_k = \pi \cdot d / 6$.

Предлагается разделить расчет на две составляющие: взаимодействие обломков ледяных полей сплоченностью $N < 9$ (между ледяными образованиями имеется чистая вода) и сплоченностью $N > 9$ (наблюдается практически сплошной ледяной покров).

При взаимодействии обломков ледяных полей сплоченностью $N < 9$ все ледяные образования движутся с одинаковой скоростью V_k и равными расстояниями между ними L_0 , тогда длина пути взаимодействия определится по формуле:

$$X = k_t V_k t_c, \quad (7)$$

где t_c – время действия расчетной ситуации с учетом вероятности столкновения, с; V_k – скорость дрейфа ледяного образования для k -й расчетной ситуации, м/с; k_t – коэффициент, исключаяющий наличие чистой воды между ледяными образованиями, определяется по формуле:

$$k_t = \frac{d_{rb}}{D_k + L_0 - d_{rb}}. \quad (8)$$

При сплоченности ледяных образований $N > 9$ длина пути взаимодействия определяется по формуле

$$X = V_k t_c. \quad (9)$$

Математическая модель формирования параметров ледовых истирающих воздействий от битого льда. При взаимодействии битого льда с сооружениями влияние многоопорности не учитывается, расчет выполняется для каждой опоры отдельно. При этом рассматриваются два расчетных случая: взаимодействие битого льда сплоченностью $N < 9$ и сплоченностью $N > 9$.

При сплоченности битого льда $N < 9$ ширина зоны контакта d_{rb} определяется подбором в зависимости от соотношения силы внедрения опоры МЛП в ледяное поле и силы остановки, рассчитанной для единичной зоны контакта (зона взаимодействия *одного* ледяного образования с сооружением). При этом ледовая нагрузка от силы остановки не должна превышать нагрузку от внедрения опоры в ледяное поле по ширине единичной зоны контакта.

На следующем шаге расчета ширина зоны контакта увеличивается за счет добавления в систему новых ледяных образований и возникновения силы обжатия F_β опоры сооружения. Это сила, возникающая за счет вытеснения ледяных образований опорой сооружения, при этом создается сжимающая боковая нагрузка в зоне контакта ледяных образований с сооружением, что увеличивает зону контакта.

Сила обжатия рассчитывается при условии, что свободное ледяное образование движется равноускорено вдоль цилиндрической опоры сооружения по окружности (допущение) и определяется из уравнения

$$F_\beta = \frac{M_0 V_k^2}{L_0} \cdot \frac{2\varphi}{\pi} \cdot (1 - \cos(\varphi)). \quad (10)$$

Длина единичной зоны контакта определится как длина дуги при условии, что ширина единичной зоны контакта d_{rb} является ее хордой по формуле:

$$d_k = d \cdot \arctg \left(\frac{r_b}{d} \right) \quad (11)$$

Если сплоченность битого льда $N > 9$, контактное напряжение в ледяной плите при взаимодействии с опорой сооружения определяется в соответствии с API 1995:

$$\sigma_p = 2C \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{4} + \varphi_{ice} / 2 \right), \quad (12)$$

где C – коэффициент сцепления, кПа; φ_{ice} – угол внутреннего трения льда.

Длина пути взаимодействия определяется по формуле (7).

Математическая модель определения глубины ледовой абразии. Контактное давление по длине зоны контакта d_k распределено равномерно в соответствии с PSTS-5. Длина пути истирания определяется для каждой расчетной точки сооружения на i -м шаге расчета как:

$$dl_i(\varphi) = dx_i \cdot \sin \varphi, \quad (13)$$

где dx_i – длина пути взаимодействия на i -м шаге расчета, φ – угловая координата расчетной точки на сооружении, относительно направления дрейфа льда.

Тогда относительная скорость взаимодействия в расчетной точке сооружения пересчитывается по формуле

$$dV_\varphi = dl_i(\varphi) / dt, \quad (14)$$

где $dl_i(\varphi)$ – длина пути истирания для расчетной точки сооружения; dt – шаг расчета по времени.

Для учета увеличения коэффициента трения при уменьшении относительной скорости взаимодействия в расчет вводится скоростной коэффициент абразии k_a , который учитывает изменение интенсивности ледовой абразии в зависимости от относительной скорости взаимодействия. Расчетная зависимость для определения скоростного коэффициента абразии $k_a = -(1/0,06) \arctg(6,25(\lg(100 \cdot dV_\varphi) + 0,3) + 0,155)$ получена на основе эмпирической зависимости изменения коэффициента трения от относительной скорости взаимодействия, предложенной Н. Saeki с соавторами.

Контактное напряжение при его равномерном распределении определяется по формуле: $\sigma_v = F / h_l d$, где F – сила взаимодействия ледяного образования с сооружением; h_l – толщина ледяного образования с учетом скола.

Глубина ледовой абразии определяется, как сумма глубин на i -м шаге расчета (Δ_i):

$$\bar{\Delta} = \sum \Delta_i = \sum \delta_{li} l_i = \sum f(\sigma_{v,i}, T_i) \cdot dl_i(\varphi), \quad (15)$$

где δ_{li} – интенсивность ледовой абразии на i -м шаге расчета (мм/км), определенная по эмпирической модели сопротивления материала ледовой абразии, как функция двух переменных контактного давления (σ_v) и температуры льда (T); $dl_i(\varphi)$ – длина пути истирания в расчетной точке сооружения на i -м шаге расчета (км).

Методика планово-высотного распределения ледовых воздействий. На планово-высотную изменчивость ледовых воздействий оказывают влияние следующие параметры:

– по высоте – колебание уровня Z и толщина ледяного образования h (модель разрушения льда h_I);

– в плане – направление дрейфа льда и соответствующая ему скорость дрейфа льда V_k ; эффект затенения от действия ледовой нагрузки; распределение контактного давления в плане $\sigma = f(\alpha)$;

– неоднородность свойств льда – распределение температуры льда по толщине $T = f(h)$, которое влияет на прочность льда R и, как следствие, на ледовую нагрузку F .

Глубина ледовой абразии является функцией времени, поэтому расчетные параметры истирающего воздействия ледяного покрова накапливаются за каждый шаг расчета. Для систематизации расчетных параметров разработан следующий алгоритм.

1. Предварительно на все сооружение накладывается сетка ячеек - кластеров, в которых накапливаются расчетные параметры ледовых истирающих воздействий и глубина ледовой абразии. Формируется система отсчета, где каждый расчетный параметр в любой точке контактной зоны является функцией двух переменных, например, для глубины ледовой абразии можно записать $\Delta = f(\varphi_h, h_z)$, где φ_h – угол привязки расчетной точки к системе отсчета; h_z – привязка расчетной точки по высоте к системе отсчета.

2. Осуществляется привязка системы отсчета к плановой ориентации сооружения по отношению к сторонам света и выбирается расчетное направление скорости дрейфа льда.

3. Определяются границы зоны контакта, которые зависят от следующих факторов, влияющих на размеры опасной зоны истирания:

– ориентации сооружения на месте установки, направления скорости дрейфа льда и эффекта затенения от действия ледовой нагрузки;

– расчетного положения уровня моря Z и толщины ледяного образования h ;

– модели разрушения ледяной плиты перед сооружением h_I ;

– длины зоны контакта d_k , которая зависит от размеров ледяных образований D и, как следствие, типа математической модели формирования ледовой нагрузки.

Зона контакта определяется на каждом шаге расчета, делится на равные участки ΔZ и накладывается на сетку кластеров сооружения.

4. Рассчитываются параметры ледовых истирающих воздействий и глубина ледовой абразии для всех кластеров зоны контакта и сохраняются в расчетных кластерах. Суммарная глубина ледовой абразии в каждом кластере сооружения является расчетной.

Предложенная методика планово-высотного распределения ледовых воздействий является структурной оболочкой программно-расчетного комплекса «IceStrIn»,

позволяет определить параметры ледовых истирающих воздействий в любой точке опасной зоны истирания и формирует «поверхность» ледовой абразии.

В пятой главе приведены результаты прямой (сравнение с натурными данными) и косвенной (сравнение с результатами исследований других авторов) верификации математических моделей ледовых истирающих воздействий, эмпирических моделей сопротивления материала ледовой абразии и методики расчета глубины ледовой абразии. Верификация методики расчета глубины ледовой абразии включает следующие этапы исследований (рис. 8).

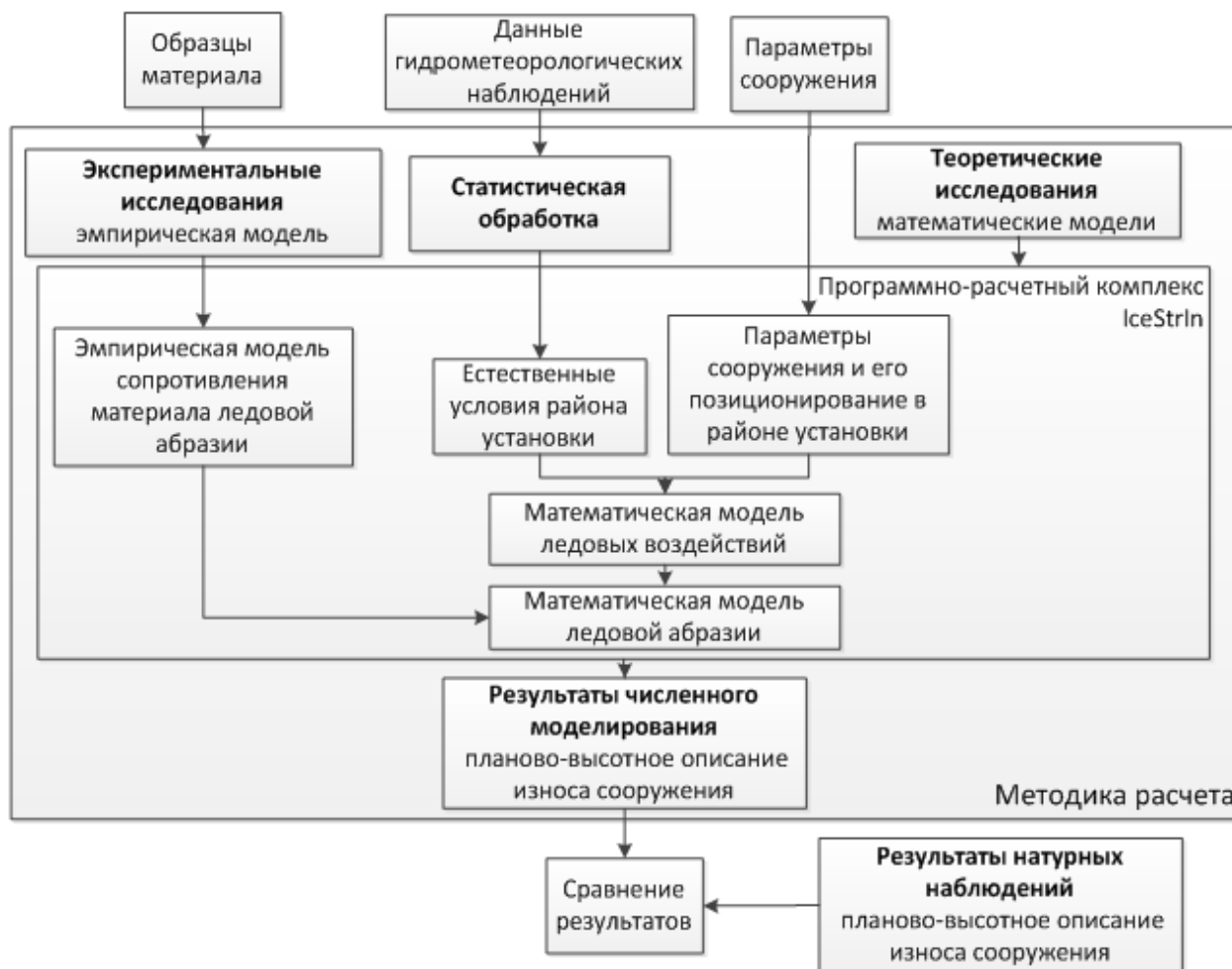


Рис. 8. Схема проведения верификации

- Обработка данных натурных наблюдений за гидрологическим режимом и метеорологическими условиями района эксплуатации сооружения и приведение их к виду, необходимому для использования в программно-расчетном комплексе «IceStrIn»

- Обработка исходных данных о геометрических параметрах опоры сооружения, назначение размеров опасной зоны истирания.

- Обработка данных наблюдений за глубиной ледовой абразии сооружения.

- Отбор образцов материала из тела сооружения в зоне воздействия льда и проведение лабораторных испытаний отобранных образцов материала на сопротивление ледовой абразии.

- Статистическая обработка данных лабораторных испытаний, получение эмпирической модели интенсивности ледовой абразии.

- Расчет глубины ледовой абразии при помощи программно-расчетного комплекса «IceStrIn».

- Сравнение результатов расчета глубины ледовой абразии с результатами натурных наблюдений, анализ результатов расчета и оценка адекватности методики расчета.

Для верификации разработанной методики расчета глубины ледовой абразии использовались:

– многолетние данные натурных наблюдений за гидрологическим режимом Балтийского моря;

– результаты натурных наблюдений за абразией бетона маяков Raahe, Oulu2, Oulu3, установленных в Ботническом заливе Балтийского моря после 44 лет эксплуатации (табл. 2);

– результаты экспериментальных исследований на ледовую абразию образцов бетона, выпиленных из кернов с этих маяков;

– результаты расчета глубины ледовой абразии с использованием программно-расчетного комплекса «IceStrIn» для гидрометеорологических условий Балтийского моря приведены в табл. 2. и на рис. 9.

Прямая верификация. Расчетные и наблюдаемые глубины ледовой абразии являются сопоставимыми величинами. При этом эпюры рассчитанной глубины ледовой абразии по высоте опасной зоны истирания практически совпадает с наблюдаемой в естественных условиях (рис. 9). На основании визуальных сопоставлений можно сделать вывод, что точность вычисления глубины ледовой абразии по разработанной методике расчета достаточно велика.

Таблица 2

Результаты расчета и наблюдаемая глубина ледовой абразии

Состав бетона	Raahe	Oulu2	Oulu3
Результаты эксперимента δ_{cp} , мм/км	0,031	0,108	0,139
Расчетный уровень, м	-0,168	-0,189	-0,189
Расчетная абразия за 44 лет эксплуатации, мм	83	38	38
Натурные измерения абразии за 44 года, мм	80	46	47

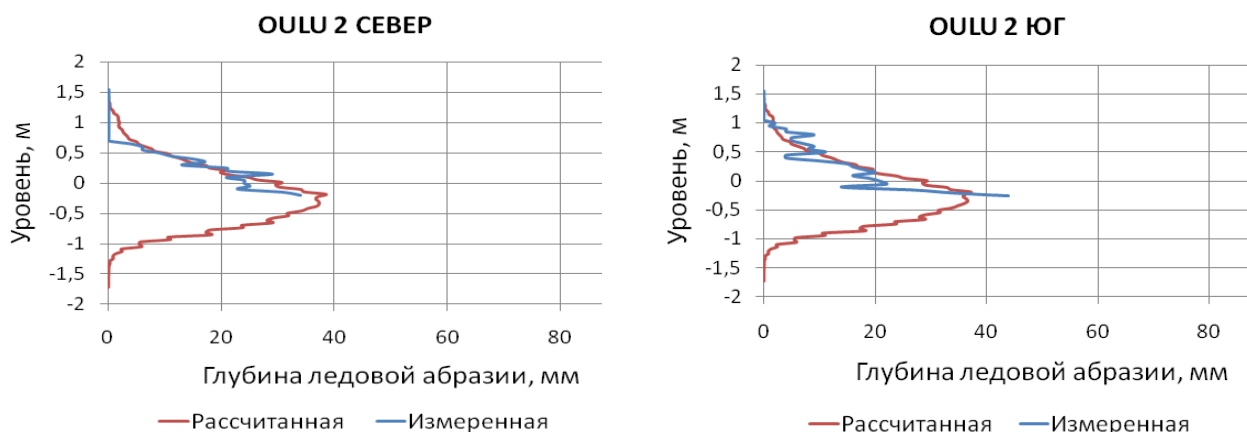


Рис. 9. Глубина ледовой абразии для маяка Oulu 2.

Корреляционный анализ двух выборок рассчитанных и измеренных значений ледовой абразии показал тесную связь между этими параметрами. Коэффициент корреляции по всей выборке значений составил $0,78 \pm 0,02$, что подтверждает адекватность разработанных математических моделей ледовых воздействий, которые отражают главные явления и процессы, вызывающие ледовую абразию бетона. В свою очередь, эмпирические модели интенсивности ледовой абразии хорошо описывают сопротивление бетона ледовой абразии.

Разница между рассчитанными и измеренными значениями глубины ледовой абразии в среднем составляет $0,112 \pm 0,869$ мм, при этом с вероятностью 68 % разница значений не превышает 1,0 мм.

Косвенная верификация. Анализ влияния входных параметров ледового режима (толщины льда, диаметра ледяного образования, сплоченности и температуры льда) на истирающее воздействие ледяного покрова оценивалось по трем группам:

- влияние на глубину ледовой абразии (изменение поверхности сооружения в результате истирающего воздействия льда, измеряемое по нормали к касательной, проведенной к поверхности сооружения в точке не подверженной ледовой абразии [мм]);
- влияние на интенсивность ледовой абразии (глубину ледовой абразии за единицу длины пути истирания [мм/км]);
- влияние на скорость ледовой абразии (глубину ледовой абразии за единицу времени [мм/с]).

Влияние толщины льда. Для всех типов ледяных образований характерна тенденция увеличения глубины ледовой абразии и уменьшение интенсивности ледовой абразии при увеличении толщины льда.

Влияние температуры. Минимальная скорость ледовой абразии характерна для больших размеров ледяных полей, при температуре льда (-2°C), что согласуется с исследованиями Н. Saeki.

Влияние *сплоченности льда*. Для всех типов ледяных образований характерна тенденция увеличения глубины и интенсивности ледовой абразии с увеличением сплоченности льда. Максимальная скорость ледовой абразии наблюдается при малых размерах ледяных образований и максимальной сплоченности льда, а минимальная скорость характерна для больших ледяных полей при минимальной сплоченности льда. Данные выводы подтверждаются натурными исследованиями J. Janson.

Влияние *размеров ледяных образований*. Для всех типов ледяных образований характерна тенденция увеличения глубины, скорости и интенсивности ледовой абразии при увеличении размеров ледяных образований.

Результаты численного эксперимента согласуются с исследованиями других авторов (D. Fiorio, J. Janson, F. Hara), что подтверждает работоспособность программно-расчетного комплекса.

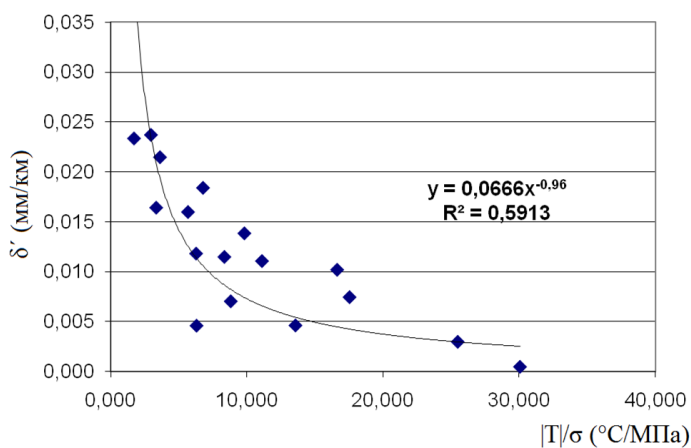
Все выше изложенное позволяет сделать вывод, что на данном этапе исследований полученные эмпирические модели интенсивности ледовой абразии, математические модели ледовых истирающих воздействий и методика расчета глубины ледовой абразии в целом могут быть использованы для прогнозной оценки глубины ледовой абразии бетонных оснований гравитационного типа и оценки надежности МЛП с позиции постепенного отказа.

В шестой главе показано применение разработанной методики на примере расчета глубины ледовой абразии IZ mix (бетон ледовой зоны В70) БОГТ «Беркут» месторождения Аркутун-Даги, построенного в рамках проекта «Сахалин 1».

В соответствии с предложенной методикой расчета на первом этапе исследований были проведены испытания образцов бетона ледовой зоны опорных колонн БОГТ «Беркут» на сопротивление ледовой абразии и получена эмпирическая модель интенсивности ледовой абразии (рис. 10).

На втором этапе исследований выполнены расчеты глубины ледовой абразии при помощи программно-расчетного комплекса «IceStrIn» для условий Охотского моря рис. 11. Результаты расчетов показали, что для принятых ледовых условий бетонное основание «Беркут» может подвергаться достаточно сильному истирающему воздействию от дрейфующего ледяного покрова, при этом на глубину ледовой абразии в основном влияет ледовая нагрузка от внедрения опоры сооружения в ледяное поле и в меньшей степени нагрузка от битого льда.

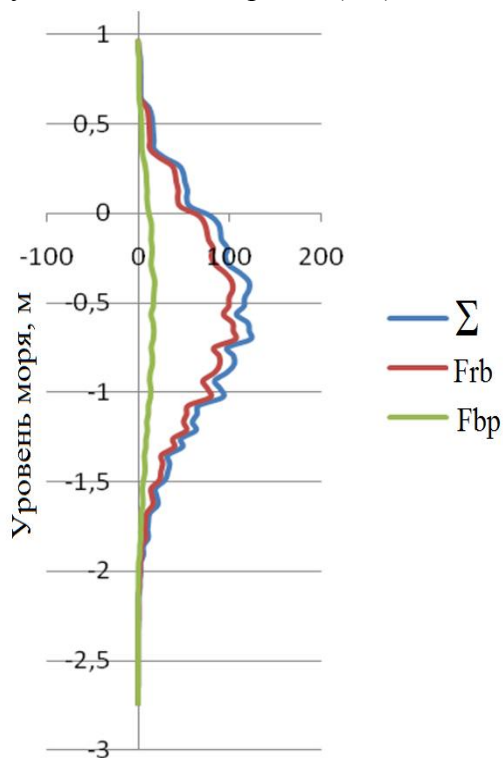
В соответствии с опытом эксплуатации БОГТ в ледовых условиях Охотского моря можно сделать вывод, что применение монолитных ледозащитных элементов из бетона повышенной износостойкости к ледовой абразии на современном этапе предпочтительнее, чем использования стальных ледозащитных поясов.



$$IZ \text{ mix} \\ \delta'_{aver} = 0,0666 \left(\frac{|T|}{\sigma} \right)^{-0,96}$$

Рис. 10. Эмпирическая модель интенсивности ледовой абразии в зависимости от температуры льда и контактного давления

Глубина ледовой абразии (мм) за 40 лет



Длина пути истирания (км) за 40 лет

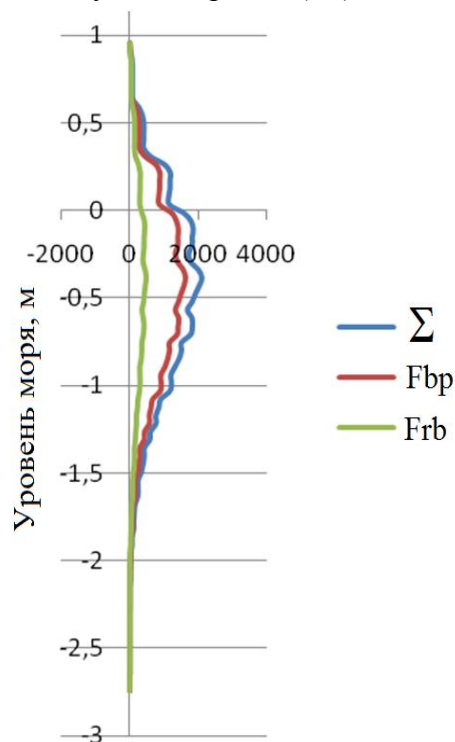


Рис. 11. Результаты расчета глубины ледовой абразии БОГТ «Беркут» (F_{rb} – абразия от битого льда; F_{bp} – абразия от ледяных полей; Σ – суммарная абразия)

Монолитные ледозащитные пояса из износостойкого бетона позволяют не только снизить ремонтные расходы и эксплуатационные затраты, связанные с обследованием бетона под облицовочными конструкциями, но и обеспечить безопасность и надежность гидротехнических объектов при конкурентоспособной стоимости подобных объектов. При этом повышение надежности гидротехнических сооружений позволит избежать экологических ущербов в результате аварий и других техногенных катастроф.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа современного состояния знаний в области истирающего воздействия ледяного покрова на морские инженерные сооружения был предложен комплексный подход к расчету глубины ледовой абразии и создана концепция оценки истирающего воздействия ледяного покрова на морские гидротехнические сооружения. Проблема ледовой абразии разделена на две части: проблема сопротивления материала конструкции истирающему воздействию льда и проблема ледовых воздействий, вызывающих абразию.

2. Проблема сопротивления материала конструкции ледовой абразии решена следующим образом.

Предложен способ оценки сопротивления материала конструкции истирающему воздействию льда.

Разработана методика лабораторных испытаний образцов материала на сопротивление ледовой абразии. В рамках методики лабораторных испытаний автором разработан план проведения экспериментальных исследований, определены условия проведения лабораторных испытаний, назначен порядок подготовки образцов бетона к лабораторным испытаниям и порядок проведения самих испытаний.

3. Проведены испытания образцов бетона на сопротивление ледовой абразии, выпиленных из кернов с фундаментов финских маяков. Получены эмпирические модели интенсивности ледовой абразии бетона финских маяков.

4. Проблема ледовых истирающих воздействий решена следующим образом.

Усовершенствована общая вероятностная имитационная модель формирования ледовых воздействий на морские гидротехнические сооружения с учетом вероятности взаимодействия дрейфующих ледяных образований с сооружением.

Адаптированы основные положения СП 38.13330.2012 по определению ледовых нагрузок к расчету параметров ледовых истирающих воздействий на морские гидротехнические сооружения.

Разработаны математические модели процессов формирования параметров ледовых истирающих воздействий для различных типов ледяных образований (ледяные поля, обломки ледяных полей, битый лед).

Разработан алгоритм учета изменчивости температуры и прочности льда по толщине ледяного покрова при стационарном режиме, который реализован в виде программы расчета «Прочность льда».

Разработана математическая модель и алгоритм расчета глубины ледовой абразии.

Разработана методика планово-высотного распределения ледовых истирающих воздействий, которая позволяет оценить глубину ледовой абразии в любой точке

опасной зоны истирания сооружения. Методика реализована в виде программы для графической интерпретации результатов расчета «Construction 3D».

5. На основе комплексного использования математических моделей ледовых истирающих воздействий и эмпирической модели сопротивления материала ледовой абразии создана методика расчета глубины ледовой абразии. Методика реализована в виде программно-расчетного комплекса «IceStrIn»

6. Проведены расчеты глубины ледовой абразии для финских маяков при помощи программно-расчетного комплекса «IceStrIn» с использованием представительных натуральных наблюдений за ледовым режимом Ботнического залива Балтийского моря и полученными эмпирическими моделями интенсивности ледовой абразии бетона.

7. Выполнена прямая верификация методики расчета, сравнение результатов расчета глубины ледовой абразии для финских маяков с натурными данными, которая показала их удовлетворительную сходимость. Доказано, что математические модели хорошо отражают основные процессы формирования параметров ледовых истирающих воздействий, эмпирические модели сопротивления бетона ледовой абразии отражают основные явления ледовой абразии бетона, а предложенная методика расчета глубины ледовой абразии является адекватной и работоспособной.

8. Проведены численные исследования математических моделей формирования параметров ледовых истирающих воздействий и косвенная верификация методики расчета глубины ледовой абразии. Определены основные закономерности изменения глубины, интенсивности и скорости ледовой абразии. Результаты численного эксперимента согласуются с исследованиями других авторов, что подтверждает работоспособность программно-расчетного комплекса «IceStrIn».

9. Проведены испытания образцов бетона на сопротивление ледовой абразии ледовой зоны основания гравитационного типа «Беркут». Получены эмпирические модели интенсивности ледовой абразии бетона ледовой зоны.

10. Выполнен расчет глубины ледовой абразии для условий северо-восточного шельфа о. Сахалин для БОГТ месторождения Аркутун-Даги за весь период эксплуатации. Результаты расчета позволили обосновать толщину ледозащитного пояса из высокопрочного бетона и использовались в отчете Ice Abrasion Test Sakhalin-1 Arkutun-Dagi GBS Project RUSD-HYY-J2-BR-37000.8888.01. На основании полученных результатов принято проектное решение о конструкции ледозащитного приспособления, которое реализовано при строительстве БОГТ «Беркут».

11. Даны рекомендации по проведению лабораторных испытаний на сопротивление ледовой абразии и по определению толщины ледозащитных приспособлений, с использованием предлагаемой автором методики и программно-расчетного комплекса «IceStrIn».

12. Разработанный комплекс математических моделей и расчетных программ по определению параметров истирающего воздействия ледяного покрова позволит существенно повысить показатели надежности и снизить степень риска МЛП, что благоприятно скажется на сроке службы гидротехнических сооружений, а также экологической безопасности акваторий обустройства морских месторождений нефти и газа на шельфе арктических и дальневосточных морей. Методика позволяет прогнозировать долговечность элементов конструкции и систему мероприятий по их текущему, среднему и капитальному ремонту.

Выше изложенные выводы свидетельствуют о том, что в рамках диссертационной работы на новом научном уровне решен комплекс проблем, связанных с оценкой истирающего воздействия дрейфующего ледяного покрова на морские гидротехнические сооружения с экспериментальной оценкой сопротивления материалов ледовой абразии. Это позволило разработать оригинальную методику расчета глубины ледовой абразии, которая в настоящее время является единственно возможным способом решения проблемы прогнозной оценки глубины истирания поверхности сооружения дрейфующим ледяным покровом за весь срок его эксплуатации. И как следствие, решить проблему конструирования ледозащитных приспособлений, что способствует освоению морских месторождений нефти и газа ледовитых морей.

Основное содержание диссертации опубликовано в 52 печатных работах, в том числе:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Уварова, Т.Э.** Режим нагружения при взаимодействии ледяного поля с сооружением / Т.Э. Уварова // В мире научных открытий. - 2011. - Т. 14, № 2. - С. 29–32.

2. **Уварова, Т.Э.** Методика определения глубины ледовой абразии / Т.Э. Уварова // Научный журнал ГОУ ВПО «БрГУ» «Системы. Методы. Технологии». - 2011. - № 4(12). - С. 46–52.

3. **Уварова, Т.Э.** Вероятностная имитационная модель взаимодействия ледяного покрова с сооружением / Т.Э. Уварова // Научный журнал ГОУ ВПО «БрГУ» «Системы. Методы. Технологии». - 2011. - № 4(12). - С. 53–60.

4. **Уварова, Т.Э.** Оценка размеров зоны ледовой абразии / Т.Э. Уварова // Сборник научных трудов «Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». - 2011. - Т. 264. - С. 130–136.

5. **Уварова, Т.Э.** Многоцикловое воздействие дрейфующего ледяного покрова на сооружения континентального шельфа / Т.Э. Уварова // Научно-технический журнал ФГБОУ ВПО «МГСУ» «Вестник МГСУ». - 2012. - № 1. - С. 41–45.

6. **Уварова, Т.Э.** Учет планово-высотной изменчивости истирающего воздействия ледяного покрова на морские инженерные сооружения / Т.Э. Уварова, Е.Е. Пом-

ников // Научно-технический журнал ФГБОУ ВПО «МГСУ» «Вестник МГСУ». - 2012. - № 1. - С. 46–50.

7. **Уварова, Т.Э.** Расчет глубины ледовой абразии для морских ледостойких платформ / Т.Э. Уварова, С.Д. Ким // Научный журнал «Научное обозрение». - 2011. - № 5. - С. 287–293.

8. **Уварова, Т.Э.** Расчет количества циклов нагружения дрейфующим ледяным покровом / Т.Э. Уварова, С.Д. Ким // Научный журнал «Научное обозрение». - 2011. - № 5. - С. 294–302.

9. **Уварова, Т.Э.** Сравнительный анализ истирающего воздействия дрейфующего ледяного покрова дальневосточных морей / Т.Э. Уварова // Научный, производственно-экономический журнал «Экономика строительства». - 2012. - № 3 (13). - С. 71–78.

10. **Уварова, Т.Э.** Неоднородность ледяных полей / А.Т. Беккер, А.Э. Фарафонов, Т.Э. Уварова // Сборник научных трудов «Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». - 2012. - Т. 265. - С. 91–100.

11. **Уварова, Т.Э.** Расчет ледовой абразии на примере маяков в Ботническом заливе / А.Т. Беккер, Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников // Научно-технический журнал «Гидротехническое строительство». – 2012 - №11. - С 27-31.

12. **Уварова, Т.Э.** Усталостная прочность элемента конструкции от действия ледовой нагрузки / Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников // Научно-технический журнал ФГБОУ ВПО «МГСУ» «Вестник МГСУ». - 2012. - №10. - С. 116-121.

13. **Уварова, Т.Э.** Нормативные методики расчета глобальной ледовой нагрузки / Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников, Г.Р. Шамсутдинова, А.С. Наркевич, В.В. Проценко // Научно-технический журнал ФГБОУ ВПО «МГСУ» «Вестник МГСУ». - 2012. - №10. - С. 122-127.

14. **Уварова, Т.Э.** Аналитический обзор методик испытаний различных материалов на сопротивление ледовой абразии / Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников // Научный журнал «Научное обозрение». - 2012. - №5. - С. 112-121.

15. **Уварова, Т.Э.** Численное моделирование ледовой абразии / Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников // Научный журнал «Научное обозрение». - 2012. - №5. - С. 122-127.

16. **Уварова, Т.Э.** Теоретические основы ледовой абразии / Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников // Научный журнал «Научное обозрение». - 2012. - №5. - С. 128-135.

17. **Уварова, Т.Э.** Расчет глубины ледовой абразии морских ледостойких платформ с учетом температуры и колебания уровня моря / А.Т. Беккер, Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников // Научно-технический журнал «Промышленное и гражданское строительство». - 2013. - №4. - С 25-27.

Публикации в изданиях, индексируемых базой Scopus

18. **Uvarova, T.E.** Load combination for offshore structures / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, L.F. Shtanko // Proc. of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE). Osaka, Japan, 1994. - Vol. 2. - P. 517–520.
19. **Uvarova, T.E.** Interactive model of ice-structure interaction / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, A.N. Chetyrbotsky // Proc. of the 8th International Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE). Montreal, Canada, 1998. - Vol. 2. - P. 493–498.
20. **Uvarova, T.E.** The analysis of ice loads on Molikpaq for Sakhalin offshore conditions / A.T. Bekker, O.A. Komarova, T.E. Uvarova, A.N. Chetyrbotsky // Proc. of the 9th International Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE). Montreal, Canada, 1999. - Vol. 2. - P. 559–568.
21. **Uvarova, T.E.** Model of ice plate failure on offshore structure contact / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, O.A. Sabodash, V.I. Seliverstov, A.E. Farafonov, S.D. Kim, V.S. Lyubimov // Proc. of the 1st Asian and Pacific Coastal Engineering Conf. (APACE 2001). Dalian, China, 2001. - Vol. 2. - P. 985–996.
22. **Uvarova, T.E.** Loading regime of ice-structure interaction / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, S.D. Kim // Proc. of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE). Stavanger, Norway, 2001. - Vol. 1. - P. 761–769.
23. **Uvarova, T.E.** Abrasion effect of ice cover on supports of Hydraulic engineering structures in conditions of Sakhalin island shelf / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, S.D. Kim // Proc. of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conf.(ISOPE). Honolulu, Hawaii, USA, 2003. - Vol. 1. - P. 473–475.
24. **Uvarova, T.E.** Model of mechanical ice-structure interaction for Sakhalin offshore conditions / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, S.D. Kim // Proc. of the 14th International Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE). Toulon, France, 2004. - Vol. 1. - P. 885–890.
25. **Uvarova, T.E.** Numerical Simulation of the Process of Interaction between Drifting Ice Fields and Structure Support / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, S.D. Kim // Proc. of the 6th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symp. Vladivostok, Russia, 2004. - P. 123–128.
26. **Uvarova, T.E.** Physical and Mechanical Properties of Modeling Ice for Investigation of Abrasion Process on Ice-Resistant Offshore Platforms / A.T. Bekker, S.G. Gomolskiy, O.A. Sabodash, R.G. Kovalenko, T.E. Uvarova, E.E. Pomnikov // Proc. of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE). Beijing, China, 2010. – Vol. 2. - P. 1231–1237.
27. **Uvarova, T.E.** The Registration of Temperature during Calculation of the Ice Abrasion / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, E.E. Pomnikov // Proc. of the 9th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symp. Bussan, Korea, 2010. - P. 226–229.

28. **Uvarova, T.E.** Experimental Study of Concrete Resistance to Ice Abrasion / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, E.E. Pomnikov, A.E. Farafonov, I.G. Prytkov, R.S. Tyutrin // Proc. of the 21th International Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE). Maui, Hawaii, USA, 2011. – Vol. 2. - P. 1044–1047.

29. **Uvarova, T.E.** Calculation of Ice Abrasion for the Lighthouses Installed in the Gulf of Bothnia / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, E.E. Pomnikov // Proc. of the 21th Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition (POAC 11). - Montreal, Canada, 2011.

30. **Uvarova, T.E.** Review of the test methods for various materials for ice abrasion resistance / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, E.E. Pomnikov, R.S. Tyutrin // Proc. of the 22th Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition (POAC 13). - Helsinki, Finland, 2013.

31. **Uvarova, T.E.** Investigation of Normative Procedures for Calculation of Ice Load for Estimating the Depth of Ice Abrasion / T.E. Uvarova, E.E. Pomnikov, R.S. Tyutrin, G.R. Shamsutdinova, A.S. Narkevich // Proc. of the 23rd International Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE). Anchorage, Alaska, USA, 2013. - Vol. 1. - P. 1308-1311.

32. **Uvarova, T.E.** Calculations Model of the Ice Abrasion Depth Volume Worn Material / T.E. Uvarova, E.E. Pomnikov, R.S. Tyutrin, A.Y. Pomnikova, G.R. Shamsutdinova // Proc. of the 23rd International Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE). Anchorage, Alaska, USA, 2013. – Vol. 1. - P. 1312-1314.

Монографии и учебные пособия

33. **Уварова, Т.Э.** Истирающее воздействие ледяного покрова на гидротехнические сооружения. Т. 1 : Аналитический обзор : монография / Т.Э. Уварова. - Владивосток : МГУ, 2011. - 120 с. - ISBN 978-5-8343-0702-0.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

34. **Уварова, Т.Э.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2012610822 Программа для определения распределения прочности и температуры льда с учетом пространственно-временной неоднородности (Прочность льда) / А.Т. Беккер, Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников. - Заявка № 2011617042 от 21.09.11; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.01.12.

35. **Уварова, Т.Э.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2011619025 Взаимодействие льда с сооружением (IceStrIn 1.0 (Fatigue) / А.Т. Беккер, Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников. - Заявка № 2011617044 от 21.09.11; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.11.11.

36. **Уварова, Т.Э.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2011619023 Взаимодействие льда с сооружением (IceStrIn 2.0 (абразия) / А.Т. Беккер, Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников. - Заявка № 2011617041 от 21.09.11; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.11.11.

37. **Уварова, Т.Э.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2011619024 Программа для графической интерпретации результатов расчета (Construction 3D) / Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников. - Заявка № 2011617043 от 21.09.11; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.11.11.

Публикации в других изданиях

38. **Uvarova, T.E.** Loading regime of ice-structure interaction / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, S.D. Kim, A.N. Morozov // Proc. of the 14th Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM-2000). - Vladivostok, Russia, 2000. - P. 264-271.

39. **Уварова, Т.Э.** Анализ ледовых нагрузок на «Моликпак» для условий шельфа о. Сахалина / А.Т. Беккер, Т.Э. Уварова, О.А. Сабодаш // Проблемы строительства и инженерной экологии Дальнего Востока : сб. науч. тр. «Архитектура и строительство». - Владивосток, 2000. - С. 98-106.

40. **Uvarova, T.E.** Abrasion effect of ice cover on supports of hydraulic engineering structures in conditions of Sakhalin island shelf / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, V.I. Selivertov et al. // Proc. of the 18th International Symp. on Okhotsk Sea & Sea Ice. - Mombetsu, Hokkaido, Japan, 2003.

41. **Уварова, Т.Э.** Исследование истирающего воздействия ледяного покрова на опоры гидротехнических сооружений в условиях шельфа о. Сахалин / А.Т. Беккер, Т.Э. Уварова, С.Д. Ким // Тр. ДВГТУ. - Владивосток, 2004. - № 137. - С. 35-40.

42. **Уварова, Т.Э.** Развитие имитационной модели взаимодействия ледяного поля с морскими ледостойкими платформами / А.Т. Беккер, Т.Э. Уварова, М.А. Слаутенко // Сб. тр. междунар. конф. «Стихия. Строительство. Безопасность». - Владивосток, 2008. - С. 49-54.

43. **Уварова, Т.Э.** Расчет усталостной прочности элемента конструкции от действия ледовой нагрузки / А.Т. Беккер, Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников // Сб. тр. междунар. конф. «Стихия. Строительство. Безопасность». - Владивосток., 2008. - С. 246-251.

44. **Uvarova, T.E.** Evaluation of area extent of structure body of marine engineering constructions suffering ice abrasion / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, M.A. Slautenko // Proc. of the 19th IAHR Int. Symp. on Ice. - Vancouver, British Columbia, Canada, 2008.

45. **Uvarova, T.E.** Fatigue strength analysis of structural elements under ice condition / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, E.E. Pomnikov // Proc. of the 20th Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition (POAC 09). - Lulea, Sweden, 2009.

46. **Уварова, Т.Э.** Физические и механические свойства модельного льда для исследования абразии морских нефтегазовых платформ / А.Т. Беккер, С.Г. Гомольский, О.А. Сабодаш, Р.Г. Коваленко, Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников // Сб. матер. науч. конф. «Вологдинские чтения» «Архитектура и строительство». - Владивосток : ДВТУ, 2010. - С. 177-189.

47. **Уварова, Т.Э.** Оценка опасности ледовой абразии морских платформ в дальневосточных морях / А.Т. Беккер, С. Якобсен, Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников, Л.В. Ким // Сб. тр. междунар. конф. «Российский арктический шельф». - СПб., 2011.
48. **Uvarova, T.E.** Numerical Simulation of Ice Abrasion on Offshore Structures / A.T. Bekker, T.E. Uvarova, E.E. Pomnikov, G.R. Shamsutdinova // Proc. of the 21th IAHR Int. Symp. on Ice. - Dalian, China, 2012. – P. 897-906.
49. **Uvarova, T.E.** Concrete Ice Abrasion due to Ice-indentation Pore Pressure / T. Uvarova, E. Pomnikov, L. Kim, A. Bekker, R. Tyutrin, S. Jacobsen, K. Høiseth // Proc. of the 1th International Congress on Durability of Concrete (ICDC–2012). - Trondheim, Norway, 2012.
50. **Уварова, Т.Э.** Теоретические основы надежности строительных конструкций, зданий и сооружений [Электронный ресурс] / Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников, А.С. Наркевич // «Вестник Инженерной школы ДВФУ». - 2012. - № 1 (10). - С. 111-115. – Режим доступа: <http://vestnikis.dvfu.ru/vestnik/archive/2012/1/19/>
51. **Уварова, Т.Э.** Спектральный анализ динамической ледовой нагрузки [Электронный ресурс] / Т.Э. Уварова, А.С. Наркевич, Г.Р. Шамсутдинова // «Вестник Инженерной школы ДВФУ». – 2013. – № 3 (16). – С. 1–6. – Режим доступа: <http://vestnikis.dvfu.ru/vestnik/archive/2013/3/1/>
52. **Уварова, Т.Э.** Определение ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа по нормам различных стран / С.Д. Ким, О.М. Финагенов, Т.Э. Уварова // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». - 2013. - № 3(14). - С 97-103.
53. **Uvarova T.E.** Calculation of the Ice Abrasion Depth of Concrete Structure Caused by Drifting Sea Ice / T.E. Uvarova A.T. Bekker, , E.E. Pomnikov, R.S. Tyutrin // Proc. of the 22th IAHR Int. Symp. on Ice. - Singapore, 2014. – P. 338-346.

Татьяна Эриковна Уварова

**ИСТИРАЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ДРЕЙФУЮЩЕГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА
НА МОРСКИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

Тираж 100 Объем 2 п.л.
