

Помников Егор Евгеньевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕ-
ДОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ВЫЗЫВАЮЩИХ АБРАЗИЮ СООРУЖЕНИЙ ШЕЛЬФА**

01.02.04 - механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Работа выполнена на кафедре механики и математического моделирования Дальневосточного Федерального Университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Беккер Александр Тевьевич

Официальные оппоненты: *Козин Виктор Михайлович*
доктор технических наук, профессор, Институт Машиностроения и металлургии Дальневосточного отделения РАН, Заведующий лабораторией Механики деформируемого твердого тела

Макарова Наталья Валентиновна

кандидат технических наук, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, старший научный сотрудник лаборатории механики необратимого деформирования

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва

Защита состоится 30 мая 2012 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ДМ005.007.02 в Институте автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, ауд. 510, e-mail: dm00500702@iacp.dvo.ru, тел./факс (423)231-04-52

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН.

Автореферат разослан 28 апреля 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук



Дудко Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одним из приоритетов мировой тенденции расширения границ освоения запасов углеводородов является освоение шельфовых месторождений замерзающих морей. Более 85% общих ресурсов нефти и газа российского шельфа сосредоточено в арктических морях. Поэтому проблема оценки ледовых воздействий на технические средства освоения морских месторождений нефти и газа является актуальной. Ее разработкой в настоящее время заняты многие зарубежные научные центры и ряд научных коллективов в нашей стране.

Существуют различные нормативные документы, в которых определяется расчетное (экспериментальное) значение ледовой нагрузки. Однако практический опыт эксплуатации показывает, что есть вероятность потери несущей способности конструкции (элемента конструкции) в результате повреждений в опасных сечениях от сравнительно умеренных воздействий большой повторяемости.

В результате динамических воздействий поверхность сооружения, контактирующая со льдом, постоянно подвергается ледовой абразии, что многократно ускоряет коррозию и разрушение материала конструкции. Величина ледовой абразии зависит от большого количества факторов, основными из которых являются контактное давление, длина пути истирания и сопротивление материала ледовой абразии.

Большинство исследований в области ледовой абразии сосредоточено на изучении самого процесса разрушения материала конструкции, но в них не рассматривается интенсивность воздействия льда на поверхность конструкции.

Результаты долгосрочных исследований ледяного покрова и его воздействий позволяют сделать вывод, что проблема абразии морских ледостойких платформ (МЛП) может быть разделена на две части. С одной стороны, глубина абразии определяется интенсивностью и продолжительностью ледового воздействия, а с другой стороны, она обусловлена способностью материала конструкции сопротивляться истирающим воздействиям.

Целью работы является разработка методики расчета глубины ледовой абразии сооружений континентального шельфа в зоне переменного уровня.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: выполнен аналитический обзор факторов, влияющих на процесс ледовой абразии; уточнена общая имитационная модель воздействия дрейфующего ледяного покрова; разработана математическая модель абразионного воздействия различных типов ледяных образований на сооружение; выполнена верификация математической модели на основе экспериментальных (натурных) данных.

Методы исследования. Для решения поставленных задач используются следующие методы: математическое моделирование; теория вероятностей и математическая статистика; физическое моделирование.

Новизна работы заключается в разработке модели взаимодействия сооружения с различными типами ледяных образований с учетом планово-высотного и временного распределения ледяного воздействия в зоне истирания, а также в уточнении общей имитационной модели воздействия дрейфующего ледяного покрова в части определения мгновенной прочности льда.

Практическое значение работы: разработанная верифицированная методика может быть применена для расчета глубины ледовой абразии морских инженерных сооружений; результаты работ использованы в отчете «Ice abrasion test», выполненном НПО «Гидротекс» по контракту с Aker Engineering & Technology; разработанная методика и компьютерная программа расчета применены при проектировании и строительстве нефтесборывающей платформы для месторождения Аркутун-Даги по проекту «Сахалин 1».

Достоверность научных положений и рекомендаций обоснована общепринятыми апробированными исходными положениями; верификацией теоретической модели по данным натурных наблюдений.

Апробация работы. Основные положения работы представлялись на 20-ой международной конференции «Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)» – Luleå, Sweden, 9-12 июня 2009; 20-ой международной конференции «International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)» – Beijing, China, 20-26 июня 2010; 9-ой международной конференции «Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium (PACOMS)» – Busan, Korea, 14-17 ноября 2010; 21-ой международной конференции ISOPE – Maui, Hawaii, USA, 19-24 июня, 2011; научных семинарах кафедры гидротехники ДВФУ (ДВГТУ) (2008-2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, получено 4 авторских свидетельства.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из глоссария, списка обозначений, введения, четырех глав, заключения, списка литературы; содержит 148 страниц текста, 109 рисунков и графиков, 11 таблиц, 168 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи и новизна полученных результатов, их эффективность и возможные области использования.

В первой главе приведен общий анализ работ, посвященных полевым, экспериментальным и теоретическим исследованиям в области изучения ледовой абразии.

Проблемой оценки интенсивности ледовой абразии гидротехнических сооружений на протяжении последних тридцати лет занимаются научные центры во всем мире: в Японии – Y. Itoh, H. Saeki (1989-1994), в Канаде и США – V. Malhotra (1988), G.C. Hoff (1989), в Норвегии – J. Janson (1988), S. Nuovinen (1990), B. Fiorio (2002), в России – А.Т. Беккер, Т.Э. Уварова, С.Д. Ким (2005-2008), С.А. Вершинин (2004-2006).

Результаты долгосрочных исследований ледяного покрова и его воздействия позволяют сделать вывод, что проблема абразии оснований гравитационного типа (ОГТ) может быть разделена на две части:

- проблема ледовой нагруженности (ледовых воздействий, вызывающих абразию);
- проблема сопротивления материала конструкции истирающему воздействию.

Большинство исследований были ориентировано на изучение сопротивления материала на образцах в лабораторных условиях, а также на изучении воздействия льда на инженерные сооружения в полевых условиях.

На основании проведенного анализа исследований были обобщены основные факторы, влияющие на ледовую абразию: контактное давление при взаимодействии льда и сооружения; путь взаимодействия (истирания) между сооружением и ледяным полем в зоне контакта; прочность и температура льда; скорость относительного перемещения при взаимодействии; сопротивление материала и его компонентов истиранию.

Процесс математического описания интенсивности воздействия льда на инженерные сооружения континентального шельфа осложнен высокой неоднородностью как физико-механических свойств ледяных образований, так и высокой степенью пространственно-временной неоднородности самого ледяного покрова в процессе перемещения (дрейфа) ледяных образований.

В настоящее время существуют различные нормы и правила (*СНУП, ВСН, DNV, ISO, API*), в которых определяется расчетное (экстремальное) значение ледовой нагрузки с точки зрения внезапного отказа сооружения при взаимодействии с ледяным образованием. Однако ни один из этих документов не дает возможности учесть все воздействия ледяных образований за период эксплуатации. Одним из способов определения режима эксплуатационной нагруженности (интенсивность воздействия за весь период эксплуатации) является имитационное моделирование. Имитационная модель должна описывать неоднородность в различных масштабах: в глобальном (возможные параметры ледяного покрова в районе строительства для конкретного сезона), в местном (возможность взаимодействия ледяного образования с опорами сооружения или, проще говоря, вероятность попадания и время существования подобной ситуации) и в малом масштабе (конкретное значение ледовой нагрузки на сооружение в конкретный момент времени, давление и длина пути взаимодействия в малые временные интервалы).

Во второй главе предложена математическая имитационная модель формирования ледовой нагрузки, расчета длины пути абразии и величины ледовой абразии от различных типов ледяных образований.

Для обоснованного определения контактного давления и длины пути истирания необходимо иметь математический аппарат для расчета ледовой нагрузки, величина которой зависит не только от свойств льда, но и от модели разрушения льда на контакте «лед-сооружение». Длина пути истирания определяется процессами дрейфа ледяных образований и их взаимодействием с опорой сооружения. Хорошо обоснованной теории

разрушения материала на контакте на данном этапе исследования нет, так как оба материала (и лед, и бетон) обладают довольно большой степенью неоднородности. Расчет ледовой абразии должен учитывать и воздействие льда на сооружение, и сопротивление ледовой абразии.

На основе принципов имитационного моделирования была уточнена *общая имитационная модель взаимодействия ледяного покрова с сооружением*. Модель основана на численном формировании функции распределения параметров ледового режима и имитации всех возможных ситуаций, характеризующихся случайным сочетанием значений входных параметров. В результате численного моделирования и имитации всех расчетных ситуаций за весь период эксплуатации сооружения определяются вероятностные характеристики ледовой нагрузки, контактного напряжения в ледяной плите, длины пути взаимодействия, длины пути истирания и глубины истирания материала корпуса конструкции.

При разработке *общей имитационной модели взаимодействия ледяного покрова с сооружением* были приняты следующие *допущения*:

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 конкретном районе морских акваторий.

3. Время расчетной ситуации определяется по формуле

$$t_k = P(V_k) \cdot P(D_k) \cdot P(h_k) \cdot P(T_k) \cdot P(N_k) \cdot P(Z_k) \cdot t_s, \quad (1)$$

где $P(V_k)$, $P(D_k)$, $P(h_k)$, $P(T_k)$, $P(N_k)$, $P(Z_k)$ – вероятности появления исходных параметров скорости дрейфа льда, размеров льдин, толщины и температуры льда, сплоченности и колебания уровня соответственно; t_s – время расчетного месяца из ледового сезона. Время существования ситуации возможного взаимодействия ледяного образования с учетом вероятности попадания льдины в сооружение может быть определено по следующей формуле: $t_c = t_k \frac{D_k + d}{10 \cdot D_k} \cdot \sqrt{N_k \cdot 10}$, где d – диаметр сооружения; D_k – диаметр льдины; N_k – сплоченность в расчетной ситуации.

4. Выделяются три основные группы возможных воздействий от движущихся ледяных формирований на сооружение в зависимости от их размеров:

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

Для описания механизмов кинематического процесса механического взаимодействия между льдинами и процесса разрушения ледяных полей на контакте с сооружением использовался дискретный подход. При взаимодействии сооружения с ледяной плитой могут наблюдаться следующие характерные случаи: **А.** Взаимодействие сооружения с *битым льдом или обломками ледяных полей*; **В.** Внедрение ледяного поля опорами сооружения; **В.1** Внедрение блока льда и торможение его перед сооружением; **В.2** Внедрение блока льда и увеличение скорости за счет добавления импульса прибывшей льдины; **В.3** Внедрение блока льда и скол ледяной плиты, взаимодействующей с сооружением; **С.** Остановка ледяного поля перед сооружением; **С.1** Остановка блока льда; **С.2** Остановка блока льда и увеличение его скорости за счет добавления импульса прибывшей льдины; **Д.** Потеря устойчивости блока льда; **Е.** Наличие чистой воды перед сооружением.

Любой сценарий взаимодействия позволяет определить основные параметры, необходимые для расчёта *эксплуатационной нагруженности*, а именно – длину зоны взаимодействия, размеры зоны взаимодействия и место ее приложения, силу на контакте «лед-сооружение», перемещение ледяного образования относительно сооружения. Основную трудность в расчете представляет определение времени и длины пути взаимодействия ледяной плиты с бетонным основанием МЛП. Для реализации этой задачи используется закон сохранения импульса и теорема об изменении кинетической энергии ледяного поля.

Математическая имитационная модель формирования ледовой нагрузки и расчета длины пути абразии от ледяных полей.

В случае **В** рассматривается центральный, полностью неупругий удар, когда вся кинетическая энергия приравнивается к работе контактной силы на пути внедрения опоры в лед. Методика определения скорости внедрения льда, а следовательно, времени и длины пути взаимодействия ледяной плиты, основана на теореме о кинетической энергии. Контактная сила определяется согласно общепринятым нормативным методикам.

Длина пути взаимодействия ледяного поля с опорой на i -ом шаге определяется по формуле:

$$\Delta x_i = V_i \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где Δt – шаг моделирования льдины по времени, с.

Изменение скорости внедрения льда с учетом силы течения можно записать в виде

$$V_{i+1} = \sqrt{\frac{M_i V_i^2 + 2(F_i - F_w) \cdot V_i \Delta t}{M_{i+1}}}, \quad (3)$$

где F_i - сила на контакте «лед-сооружение» на i -ом шаге расчета; F_w – сила трения от течения.

После остановки и сброса нагрузки (случай **С**) картина циклически повторяется по мере поступления новых льдин. При этом расстояние между блоком льда, остановившимся перед опорой, и следующей льдиной оценивается по формуле

$$L_{i+1} = L_i - V_k \Delta t + V_i \Delta t, \quad (4)$$

где L_i – расстояние между приближающейся льдиной и крайним стоящим перед опорой ледяным образованием, м; V_k – скорость дрейфа льдины в k -ой ситуации.

В случае, если льдина соприкоснулась со стоящим перед опорой блоком льда, число льдин в системе увеличивается на единицу, L_i полагается равным L_0 , и цикл повторяется.

Расчет продолжается до тех пор, пока время расчета t станет равным времени расчетной ситуации с учетом вероятности столкновения ледяного образования с опорой сооружения t_c .

Ширина зоны контакта для ледяных полей принимается равной диаметру опоры: $d_{rb}=d$, тогда длина зоны контакта для ледяных полей принимается равной длине дуги $d_k=0,5\pi d$, где d – диаметр опоры, м.

Математическая имитационная модель формирования ледовой нагрузки и расчета длины пути абразии от обломков ледяных полей.

При взаимодействии обломков ледяных полей размером от $4d$ до 500м с опорой сооружения с целью упрощения математической интерпретации принимаются следующие допущения:

- 1) 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;
- 2) ширина зоны контакта принимается равной $d_{rb}=d/4$ (как наиболее вероятная величина контактной зоны), тогда длина зоны контакта определяется по формуле

$$d_k = \frac{d}{2} \arccos\left(\frac{1}{2}\right), \quad (5)$$

где d – диаметр опоры сооружения, м.

Математическая имитационная модель формирования ледовой нагрузки и расчета длины пути взаимодействия от битого льда.

Для уточнения величины зоны контакта за счет добавления в систему новых ледяных образований принимается, что при взаимодействии сооружения с битым льдом свободное ледяное поле движется равноускоренно вдоль цилиндрической опоры сооружения по окружности радиусом R_j (радиус поворота).

В этом случае угловая скорость ω при движении от $\varphi=0$ до $\varphi=\pi/2$ изменяется в соответствии с законом равноускоренного движения по окружности. Центробежную силу движения ледяного образования определяют из уравнения

$$F(b) = \frac{M_0 V_k^2}{L_0} \cdot \frac{2j}{p} \cdot (1 - \cos(j)). \quad (6)$$

При взаимодействии ледяного поля с опорой сооружения ледовая нагрузка от силы обжатия (центростремительной силы движения ледяного образования) не должна превышать нагрузку от внедрения опоры в ледяное поле на ширине зоны взаимодействия контакта, т.е. $F_{\beta} \leq F_{bp}$. Если условие выполняется, то есть ледовой нагрузки недостаточно для внедрения опоры сооружения в ледяное образование, тогда необходимо увеличить ширину зоны контакта d_{rb} , и расчет продолжается до тех пор, пока F_{β} станет равным F_{bp} ($F_{\beta} = F_{bp}$).

В противном случае (если условие $F_{\beta} \leq F_{bp}$ не выполняется) за расчетную нагрузку от битого льда принимается сила обжатия ледяного образования $F_i = F_{\beta}$.

Длина зоны контакта определяется как длина дуги при условии, что d_{rb} является ее хордой по формуле

$$d_k = d \cdot \arctan\left(\frac{d_{rb}}{d}\right). \quad (7)$$

Математическая модель определения глубины истирания.

Длина пути истирания l_k в каждой расчетной ситуации позволяет определить интересующее нас значение пути скольжения ледяного поля относительно опоры сооружения, которое распределено по синусу

$$l_k = X \sin \alpha, \quad (8)$$

где α – угол между румбом и точкой на опоре, для которой рассчитывается глубина истирания, X – длина пути взаимодействия, м.

Распределение давления на контакте опоры с ледяными образованиями формируется за счет ледовой нагрузки в зоне разрушения ледяного поля, которое образует контактную зону. Контактное напряжение при его равномерном распределении определяется по формуле

$$s_v = \frac{F}{h_l d_k}, \quad (9)$$

где F – сила взаимодействия ледяного образования с сооружением, определяемая согласно предложенному выше алгоритму; h_l – толщина ледяного покрова с учетом скола, м.

Учитывая принятое распределение давления на контакте и общепринятое разделение результатов наблюдений за скоростью дрейфа льда по 8 румбам, для определения максимальной глубины абразии в точке в расчет принимается пять направлений дрейфа

для учета всех неблагоприятных направлений воздействия льда для рассматриваемой точки, что важно при проектировании ледозащитного пояса.

На основании проведенных лабораторных исследований образцов бетона различного состава предлагается следующий вид эмпирической зависимости для определения удельной глубины абразии бетона δ (мм/км):

$$d = \frac{\Delta}{L} = f(s_v, T), \quad (10)$$

где Δ – средняя глубина абразии, мм; L – длина пути абразии, км; s_v – контактное напряжение в ледяной плите, МПа; T – температура льда, °С.

Глубина абразии на i -м шаге вычисляется зависимостью

$$\Delta_i = f(s_{v,i}, T_i) \cdot l_i. \quad (11)$$

Учитывая изменчивость l_i и $s_{v,i}$ на каждом i -м шаге, определяется общая глубина абразии

$$\bar{\Delta} = \sum \Delta_i = \sum d_i l_i = \sum f(s_{v,i}, T_i) \cdot l_i, \quad (12)$$

где d – эмпирическая модель для конкретного типа бетона, определяемая на основании экспериментальных исследований.

В третьей главе выполнена косвенная верификация – численный эксперимент и сопоставление результатов с исследованиями других авторов, приведены результаты исследования математической модели, выявлены зависимости ледовой абразии от различных факторов. В работе также представлены результаты прямой верификации с использованием данных натуральных наблюдений.

Для исследования влияния этих факторов на величину ледовой абразии были выполнены полнофакторные численные эксперименты с использованием разработанного алгоритма и программы расчета.

Ниже приведены основные выводы из анализа результатов численного эксперимента, которые согласуются с результатами исследований таких авторов, как Н. Saeki, В. Fiorio, J. Janson, Ф. Hara.

Для ледяных полей и для обломков ледяных полей с понижением температуры скорость ледовой абразии уменьшается. Для ледяных полей характерно увеличение скорости ледовой абразии с понижением температуры, что обусловлено большими размерами ледяных полей.

Для битого льда при увеличении сплоченности скорость абразии увеличивается. При сплоченности $N=7$ баллов скорость абразии минимальна, при увеличении сплоченности до $N=9$ баллов наблюдается ее резкое увеличение с последующей стабилизацией процесса, т.е. при сплоченности $N=9 \div 10$ баллов изменение скорости абразии незначительно.

В то время как для *ледяных полей* при сплоченности $N=7\div 9$ баллов наблюдается минимальная скорость ледовой абразии с резким увеличением при $N=10$ баллов.

Для *обломков ледяных полей* сплоченность влияет на скорость ледовой абразии незначительно.

Максимальная скорость ледовой абразии наблюдается при малых размерах ледяных образований ($D=1$ м) и максимальной сплоченности льда, а минимальная скорость характерна для больших ледяных полей при минимальной сплоченности льда.

Для ледяных образований до 500 м (*битый лед* и *обломки ледяных полей*) с увеличением толщины льда скорость абразии увеличивается, в то время как для *ледяных полей* с увеличением толщины льда скорость абразии уменьшается. При сплоченности $N=10$ баллов для всех ледяных образований характерно увеличение скорости абразии с увеличением толщины льда. Максимальная скорость ледовой абразии наблюдается при максимальных размерах ледяных полей и максимальной толщине льда, а минимальная характерна для тех же размеров ледяных полей и минимальной толщины льда.

Для *всех типов ледяных образований* при увеличении скорости дрейфа льда скорость абразии увеличивается, при этом с увеличением сплоченности и уменьшением скорости абразии уменьшается. Закон изменения скорости ледовой абразии в зависимости от скорости дрейфа льда нелинейный и близок к параболе.

Для *всех типов ледяных образований* при увеличении размеров ледяных образований скорость ледовой абразии увеличивается.

Анализ результатов лабораторных исследований в рамках работ, выполняемых по проекту «Сахалин 1» для месторождения Аркутун-Даги компанией Гидротекс, были проведены лабораторные испытания образцов бетона, отобранных из маяков Oulu2, Oulu3 и Raahе, расположенных в Ботническом заливе. В конструктивном отношении маяки представляют собой гравитационное железобетонное сооружение с диаметром основания приблизительно 7,4 м. Выбор маяков был обусловлен тем, что за 54 года эксплуатации этих маяков они постоянно подвергались абразионному воздействию.

Описание ледовых условий в Ботническом заливе

Северная часть Ботнического залива покрыта льдом 160-210 дней в году, средняя часть – 185 дней. Наибольшая продолжительность этого периода (220-245 дней) наблюдается в Ботническом заливе в районе рассматриваемых маяков.

Средняя толщина льда невелика (0,1-0,3 м), но в суровые и очень суровые зимы она может увеличиваться до 1 м.

Расчетные параметры гидрометеорологического и ледового режима в районе маяка Raahе были предоставлены компанией «Aker Solution» и специально обработаны для использования их в программе ICESTRIN. Исходные данные представляют собой гисто-

граммы помесечных (январь-май) распределений основных расчетных параметров, к которым относятся сплоченность дрейфующего ледяного покрова; толщина ровного льда; скорость дрейфа ледяных полей; колебания уровня моря.

Результаты расчета

Вычисления глубины ледовой абразии маяка Raahе были выполнены при помощи разработанной программы ICESTRIN. Эмпирическая модель ледовой абразии была получена путем лабораторных испытаний образцов бетона, взятых с маяка на 1.5 м выше среднего уровня моря.

На рис. 1 приведены результаты расчета и натурных измерений ледовой абразии на маяке Raahе.

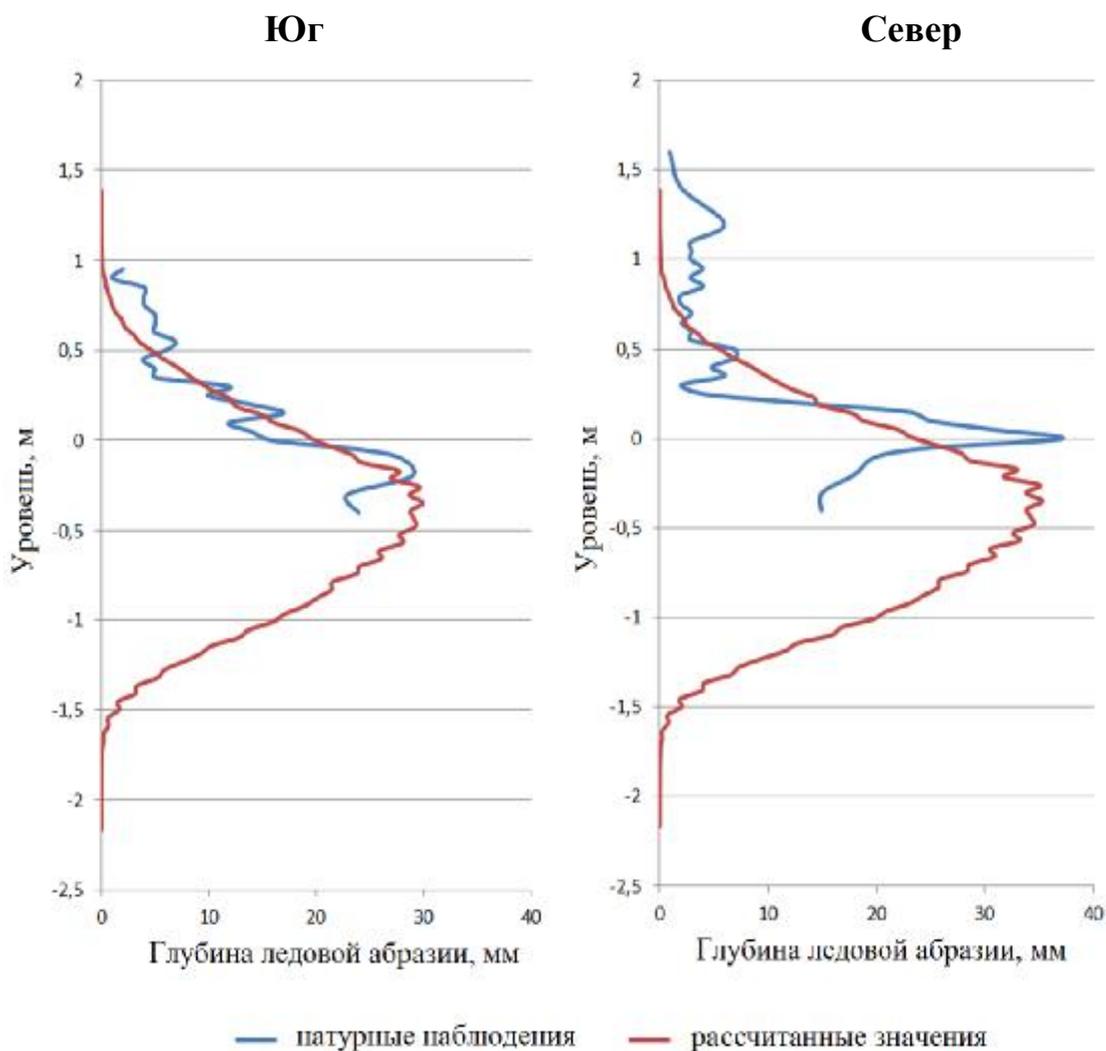


Рис. 1. Величина ледовой абразии по различным направлениям

Следует отметить, что форма распределения рассчитанной глубины ледовой абразии по высоте практически совпадает с наблюдаемой. На основании этих сопоставлений можно сделать вывод, что точность вычисления глубины ледовой абразии разработанной математической модели достаточно велика. Таким образом, расчетные и наблюдаемые глубины ледовой абразии являются сопоставимыми величинами.

В четвертой главе приведен общий порядок расчета и пример расчета ледовой абразии для сооружения, установленного в условиях Охотского моря.

Исходными данными для расчета являются параметры сооружения (диаметр сооружения d , форма опоры m) и параметры ледяного покрова (гистограммы сплоченности льда, размеров льдин, толщины льда, прочности льда, скорости льда по восьми румбам и колебания уровня).

Общий порядок расчета

1. Осуществляется моделирование ледового режима перебором входных параметров h, D, N, T, V, Z таким образом, чтобы охватить все расчетные ситуации, т.е. все возможные сочетания параметров.

В результате k -ого сочетания параметров имитируется конкретная расчетная ситуация ледового режима со следующими параметрами: $h_k, D_k, N_k, T_k, V_k, Z_k$. Кроме того, определяются вероятности их появления $P(V_k), P(D_k), P(h_k), P(T_k), P(N_k), P(Z_k)$.

2. Определяется время существования k -ого сочетания параметров ледового режима t_k с учетом вероятностного сочетания параметров по формуле (1).

3. На каждом i -ом шаге имитационного расчета моделируется процесс механического взаимодействия ледяных полей с опорой морских инженерных сооружений с толщиной h_k , размерами ледяных полей D_k , сплоченностью N_k , температурой ледяного покрова T_k , прочностью R_k и скоростью V_k , а также учитывается процесс колебания уровня моря Z_k . Рассматриваемый процесс имеет продолжительность t_k .

В результате моделирования процесса взаимодействия можно получить значения ледовой нагрузки F_i и длину перемещения ледяного покрова при взаимодействии с сооружением X_i – длина пути взаимодействия.

4. На основе полученных данных моделируется процесс истирания материала конструкции. В результате получают контактное напряжение в ледяной плите $\sigma_{v,i}$, длину пути истирания $l_{v,i}$ и глубину истирания материала конструкции S_i с учетом колебания уровня моря.

5. Процесс повторяется до полного перебора всех возможных сочетаний значений параметров ледового режима.

В результате моделирования могут быть получены параметры эксплуатационной нагруженности.

Методика расчета была апробирована на ледостойкой стационарной платформе для Аркутун-Дагинского месторождения (проект «Сахалин 1»), которое представляет собой железобетонное четырех опорное основание гравитационного типа с размерами кессона в плане 132,6 x 100 м, устанавливаемое на месторождении на глубине 33,6 м.

Ледовый режим северо-восточного шельфа о. Сахалин является одним из самых

тяжелых и сопоставим с арктическими морями. Средняя продолжительность ледового периода в северо-западной части моря составляет 260 суток, у побережья о. Сахалин – до 200, на юге – до 120 суток. Общий суммарный дрейф льда через точку акватории для условий Охотского моря может достигать 4000 км/год.

Результаты расчетов показали, что бетонное основание платформы Аркутун-Даги может подвергаться достаточно сильному истирающему воздействию от дрейфующего ледяного покрова. Графическое изображение поверхности изношенного материала за весь период эксплуатации (40 лет) показан на рис. 2 (чем светлее, тем больше глубина абразии).

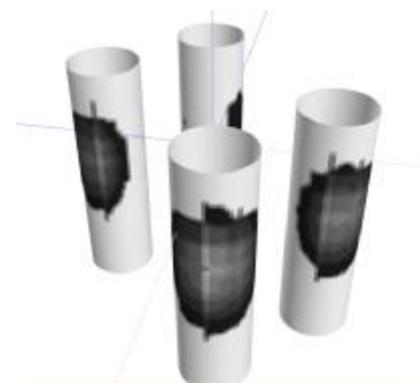


Рис. 2 – Результаты расчета глубины ледовой абразии

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. В работе была предложена методика определения величины ледовой абразии сооружения дрейфующим ледяным покровом. Методика реализована в форме разработанной автором вероятностной модели формирования ледовой нагрузки и имитационной детерминированной модели механического взаимодействия льда с опорой МЛП, являющейся частью вероятностной модели формирования ледовой нагрузки. Модель основана на энергетическом подходе к определению ледовой нагрузки и описывается дифференциальным и балансовым соотношениями.

2. Разработан численный алгоритм общей вероятностной модели взаимодействия и программа расчета «IceStrIn».

3. Разработанная математическая модель позволяет определить эксплуатационную нагруженность сооружения (давление на контакте и длину пути взаимодействия для каждой точки за весь период эксплуатации сооружения) с учетом параметров сооружения и основных характеристик ледового режима района строительства.

4. Для изучения процесса формирования ледовой нагрузки в модели механического взаимодействия ледяных полей с МЛП в работе были выполнены численные эксперименты с помощью разработанной автором компьютерной программы. Численные исследования детерминированной модели показали ее работоспособность и позволили получить функциональную зависимость величины ледовой абразии от основных исходных параметров, которая может быть использована на предварительных стадиях проектирования.

5. Была проведена верификация модели на основании натуральных данных, полученных с маяков, которые подвергались абразионному воздействию льда в течение 44 лет.

6. В качестве апробации методики выполнено моделирование конкретного объекта – морской ледостойкой платформы для Аркутун-Дагинского месторождения. Предложенная в работе методика ориентирована на прогноз разрушения элементов конструкции в процессе эксплуатации.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы в изданиях, реферируемых базой Scopus

1. Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E., Gomolskiy S.G., Sabodash O.A., Kovalenko R.G., Prytkov I.G. Physical and Mechanical Properties of Modeling Ice for Investigation of Abrasion Process on Ice-Resistant Offshore Platforms // Proc. of the 20-th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE), Beijing, China, 2010. P. 1231-1237.

2. Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E. The Registration of Temperature during Calculation of the Ice Abrasion // Proc. of the 9-th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symp., Busan, Korea, 2010, P. 226-229.

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

Научные работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

4. Уварова Т.Э., Помников Е.Е. Учет планово-высотной изменчивости истирающего воздействия ледяного покрова на морские инженерные сооружения // Научно-технический журнал ФГБОУ ВПО «МГСУ» «Вестник МГСУ». 2012. №1. С. 46-50.

Научные работы в других изданиях

5. Беккер А.Т., Уварова Т.Э., Помников Е.Е. Расчет усталостной прочности элемента конструкции от действия ледовой нагрузки // В сб. тр. междунар. конф. «Стихия Строительство Безопасность», Владивосток, Россия, 2008, с. 246-251.

6. Помников Е.Е. Расчет усталостной прочности элемента конструкции от действия ледовой нагрузки // Межвузовский сборник статей лауреатов конкурсов. Выпуск 11; Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. Н.Новгород: ННГАСУ, 2009. С. 315-317.

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

8. Помников Е.Е. Влияние формы ледяного образования на величину ледовой нагрузки // Материалы рег. науч. конф. «Молодежь и научно-технический прогресс». ч. II. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2010. С. 239-243.

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

10. Помников Е.Е., Семенов В.В. Имитационная модель расчета ледовой нагрузки // Материалы рег. науч. конф. «Молодежь и научно-технический прогресс» ч. II. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2011, с. 187-192.

11. Помников Е.Е., Сидельникова Е.Л. Пример расчета глубины ледовой абразии МЛП для условий Охотского моря // Материалы рег. науч. конф. «Молодежь и научно-технический прогресс». ч. II. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2011, с. 196-203.

12. Помников Е.Е., Шмыков А.А. Варианты конструкций платформ для освоения углеводородов на шельфе северных морей // Материалы рег. науч. конф. «Молодежь и научно-

технический прогресс». ч. II. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2011, с. 230-235.

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

14. Беккер А.Т., Якобсен С., Ким Л.В., Уварова Т.Э., Помников Е.Е. Оценки опасности ледовой абразии морских платформ в дальневосточных морях // Тр. 10-й Междун. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO / CIS Offshore 2011). СПб.: ХИМИЗДАТ, 2011. С. 262–265.

Авторские свидетельства

15. Св-во... № 2011619023 Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ. 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.

16. Св-во... № 2011619024 Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ. 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.

17. Св-во... № 2012610822 Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ. 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.

18. Св-во... № 2012610822 Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ. Программа для определения распределения прочности и температуры льда с учетом пространственно временной неоднородности (Прочность льда) Заявка № 2011617042 от 21.09.11; зарегистрирована. в Реестре программ для ЭВМ 18.01.12.

Личный вклад автора. Работы [6, 8] выполнены автором лично. В работах [1-4, 9-11, 13, 14] автор участвовал в обсуждении модели, разрабатывал численную схему и выполнил все необходимые расчеты. В работах [5, 7, 12] автор принимал участие в постановке задачи, в [8, 9] – в предварительном математическом моделировании технологического процесса.

Егор Евгеньевич ПОМНИКОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ВЫЗЫВАЮЩИХ АБРАЗИЮ СООРУЖЕНИЙ ШЕЛЬФА

АВТОРЕФЕРАТ

Подписано к печати 27.04.2012 г.
Формат 60*84/16

Усл.п.л. 1 Уч.-изд.л. 0.8
Тираж 100. Заказ 217

Издано ДВФУ, г. Владивосток, ул. Пушкинская, 10.

Отпечатано в типографии № 2 ИПК ДВФУ, 690990, г. Владивосток, ул. Пушкинская, 10.