

Дальневосточный федеральный университет

Политехнический институт
Департамент «Морские арктические технологии»

**О разработках Дальневосточного
федерального университета в освоении ресурсов
Арктики, Арктического пространства и Дальнего Востока**

Александр Т. Беккер

Научный руководитель Политехнического института

Директор МНОЦ «Арктика»

Профессор, д.т.н., академик РААСН

Владивосток

2022

Разработка методов расчета ледовых нагрузок и воздействий на инженерные сооружения континентального шельфа ледовитых морей

Основной проблемой, препятствующей ускоренное освоение месторождений углеводородов на шельфах арктических и субарктических морей, является наличие ледяного покрова. Поэтому исследования ледовых нагрузок и воздействий на морские инженерные сооружения для творческого коллектива стали приоритетными, и продолжаются до настоящего времени.

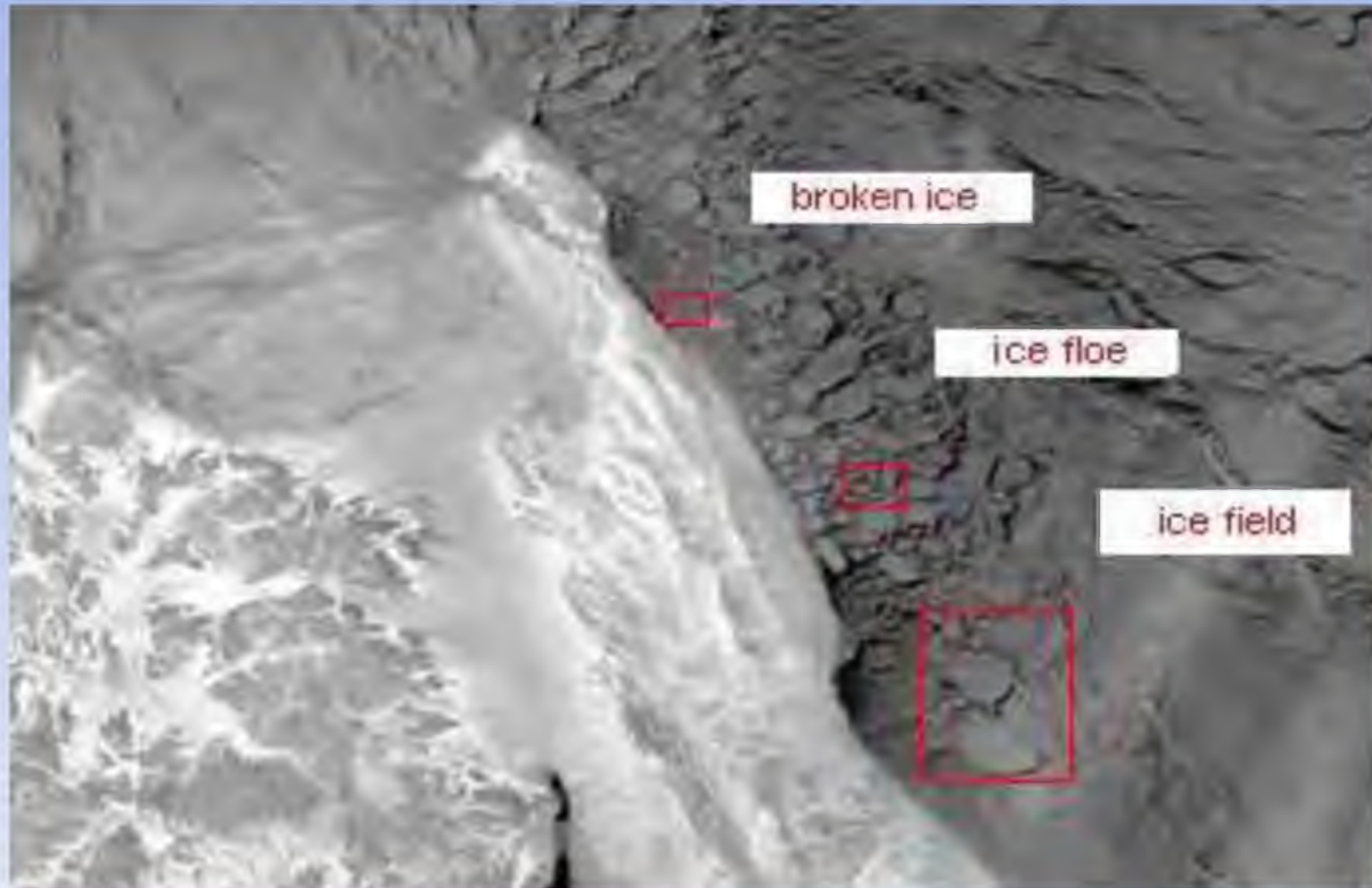
Сформированы цели и задачи для решения этой комплексной проблемы, разработаны концептуальные подходы к решению актуальной проблемы обустройства морских месторождений нефти и газа на континентальных шельфах ледовитых морей.

Выполнен комплекс теоретических и уникальных экспериментальных исследований на ледяном покрове в натуральных условиях и в лабораториях.

Разработаны специальные методики экспериментальных исследований и специальное оборудование, защищенные патентами и авторскими свидетельствами.

Учитывая случайный характер ледового режима акваторий, его параметры изучались с позиций теории вероятности и теории надежности.

Спутниковый снимок дрейфующего ледяного покрова вдоль северо-восточного побережья о. Сахалин



Результаты фундаментальных исследований в области ледовых нагрузок и воздействий на МНГС

- Теоретические основы вероятностного подхода к описанию дрейфующего ледяного покрова, как случайного процесса;
- Теоретические основы Разработка имитационного моделирования процессов формирования ледовых нагрузок и воздействий на морские нефтегазовые сооружения на континентальных шельфах ледовитых морей;
- Методология определения степени сопротивления материалов ледовой абразии;
- Теоретические основы методологии определения глубины ледовой абразии материалов конструкций МНГС за весь период эксплуатации;
- Теоретические основы подхода к исследованию льда, как материала, и как среды, формирующей ледовые нагрузки и воздействия на МНГС.

Результаты прикладных исследований в области расчета ледовых нагрузок и воздействий на МНГП

- Численные модели и методика определения вероятностных характеристик ледовых нагрузок на морские нефтегазовые платформы (МНГП);
- Численные модели параметров ледовых истирающих воздействий, вызывающих абразию материала конструкции сооружения;
- Методика экспериментального определения сопротивления материалов ледовому истиранию;
- Численные модели и методика определения глубины ледовой абразии конструкций морских гидротехнических сооружений;
- Численные модели экстремальных ледовых нагрузок от торосов на морские нефтегазовые платформы (МНГП);
- Численные модели и методика выбора оптимальной трассы подводного трубопровода;
- Технология оценки степени неоднородности ледяного покрова;
- Методика определения прочностных параметров ледяного покрова на основе корреляционных связей и другие.

Моделирование ледяного покрова и его воздействий на Морские нефтегазовые сооружения (МНГС)

Математическое моделирование воздействия дрейфующего ледяного покрова на МНГС

- Проблема определения ледовых внешних нагрузок и воздействий на инженерные сооружения решается на основе **теоретических и экспериментальных** исследований природных явлений, вызывающих ледовые нагрузки и воздействия, путем создания специальных методов расчета.
- Проблема определения ледовых нагрузок на МНГС находится в настоящее время в **стадии изучения природного явления** – ледяного покрова морских акваторий и его динамики, разработки моделей формирования внешних ледовых нагрузок и воздействий.
- Ситуация осложняется **случайной природой данного явления**, характеризующегося большим количеством факторов и их высокой степенью **пространственно-временной изменчивости**. При этом требуемая **степень точности** определения ледовых нагрузок и воздействий на сооружения достаточно высокая, и определяется высокой степенью ответственности объектов.
- Процесс взаимодействия ледяного покрова с МЛП имеет сложную пространственно-временную структуру и состоит из достаточно сложных подсистем. Если учесть к тому же уникальность МЛП, то с полным правом **систему «МНГП – ледяной покров»** можно отнести к одной из **самых сложных систем**.

Цели и задачи

ЦЕЛЬ:

Повышение надежности морских нефтегазовых сооружений (МНГС) путем совершенствования методов расчета ледовых нагрузок и воздействий.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

1. Разработка моделей динамики дрейфующего ледяного покрова применительно к проблеме формирования ледовых нагрузок и воздействий на МНГС.
2. Разработка моделей формирования ледовых нагрузок и воздействий за весь период эксплуатации сооружений в вероятностной постановке.
3. Разработка модели взаимодействия ровного ледяного покрова с МНГС.
4. Разработка модели взаимодействия торосов с МНГС.

Общая постановка проблемы

- Ледовый режим в нашей задаче характеризуется комплексом параметров:
 - толщиной льда,
 - скоростью дрейфа,
 - прочностью,
 - размерами ледяных полей,
 - сплоченностью ледяного покрова,
 - уровнем воды и т.п.
- Параметры ледового режима могут быть представлены **случайными величинами или случайными процессами.**
- По существу, при вероятностном подходе определяется **совокупность возможных режимов** эксплуатации сооружения.
- Для оценки надежности МЛП на наступление **внезапного отказа** в качестве выходного параметра может служить **экстремальные значения ледовой нагрузки.**
- Для оценки надежности МЛП на наступление постепенного отказа необходимы следующие параметры режима нагружения МЛП: **ледовая нагрузка, количество циклов нагружения и связь между ними.**

Концепция вероятностного описания ледяного покрова и его воздействий на МНГС 80-е годы

Концепция учитывает вероятностный характер явления и возможность наступления двух видов отказов сооружения в постановке теории надежности. Концепция включает следующие основополагающие допущения.

Во-первых, учет изменчивости ледовых нагрузок предложено осуществлять **в трех временных масштабах**: «большом» – многолетнем, «среднем» – сезонном, «малом» – процесс контактного взаимодействия с сооружением.

Во-вторых, для математического описания ледового режима морских акваторий предложено дрейфующий ледяной покров **условно разделяется на следующие группы**:

- **включающая только ровные ледяные поля с градацией по размерам,**
- **включающая только крупные ледяные образования (торосы, гряды и т.п.).**

Такой подход упрощает описание, т.к. позволяет оперировать отдельными составляющими ледового режима, что соответствует общепринятому дифференцированному подходу к оценке надежности сооружений на постепенный и внезапный отказы.

В-третьих, при расчете надежности МНС на наступление внезапного отказа достаточно учитывать воздействия только ледяные образования, создающие в конкретных условиях эксплуатации МНГС экстремальные ледовые нагрузки.

В-четвертых, при расчете надежности МНС на наступление постепенного отказа (усталость, истирание и т.п.) надо учитывать воздействия за весь период эксплуатации МНГС всех возможных ледяных образований, которые действуют систематически и создают ледовые нагрузки и воздействия в широком диапазоне величин.

Имитационная модель воздействия дрейфующих ледяных полей на МЛП для целей расчетов на усталость

Общие ДОПУЩЕНИЯ:

1. Ледяной покров - совокупность полей, равномерно распределенных по площади акватории, с параметрами:
 - толщиной h ,
 - скоростью дрейфа V ,
 - диаметром полей D ,
 - прочностью льда R ,
 - сплоченностью N ,
 - уровень воды, a .

2. Параметры ледяного покрова – независимые случайные величины, представленные в виде **подекадных гистограмм**, построенных на основе многолетних рядов наблюдений в конкретном районе акватории.

Феноменологическая модель разрушения ледяной плиты на контакте с сооружением

Основные допущения

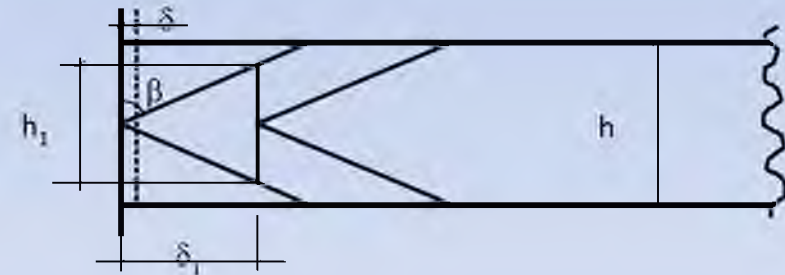
- Разрушение ледяного поля толщиной h на контакте с сооружением происходит путем двустороннего скола (сдвига) ледяных треугольных призм. Угол скола β определяется из теории предельного равновесия Кулона.
- Второй и последующие сколы происходят при достижении вертикального размера контактной площади, равного

$$h_1 = \frac{h}{a\sqrt[4]{\dot{\varepsilon}}}$$

где h – толщина ледяного поля, м;

$\dot{\varepsilon}$ – скорость относительных деформаций льда, c^{-1} ;

a – эмпирический коэффициент



Экспериментальные исследования взаимодействия цилиндрического индентора с ледяной плитой для обоснования допущения № 4

Экспериментальные исследования взаимодействия цилиндрического индентора с ледяной плитой для обоснования допущения № 4

Экспериментальная установка

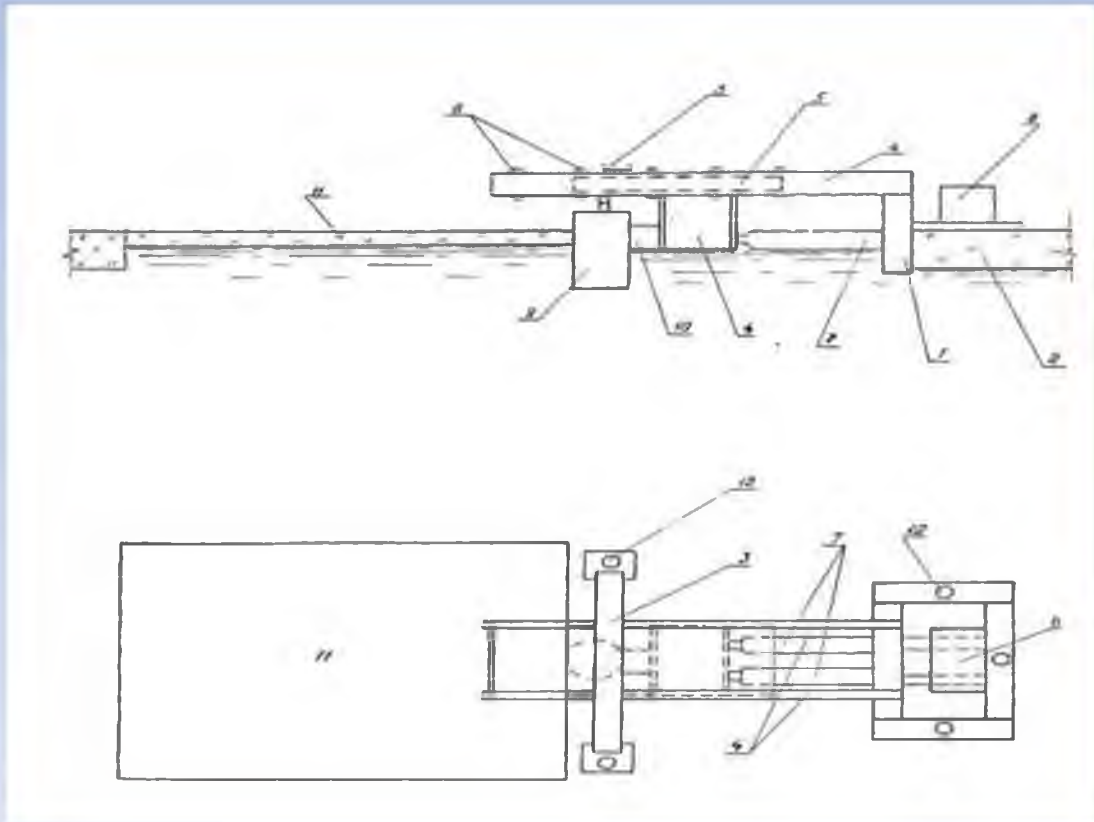
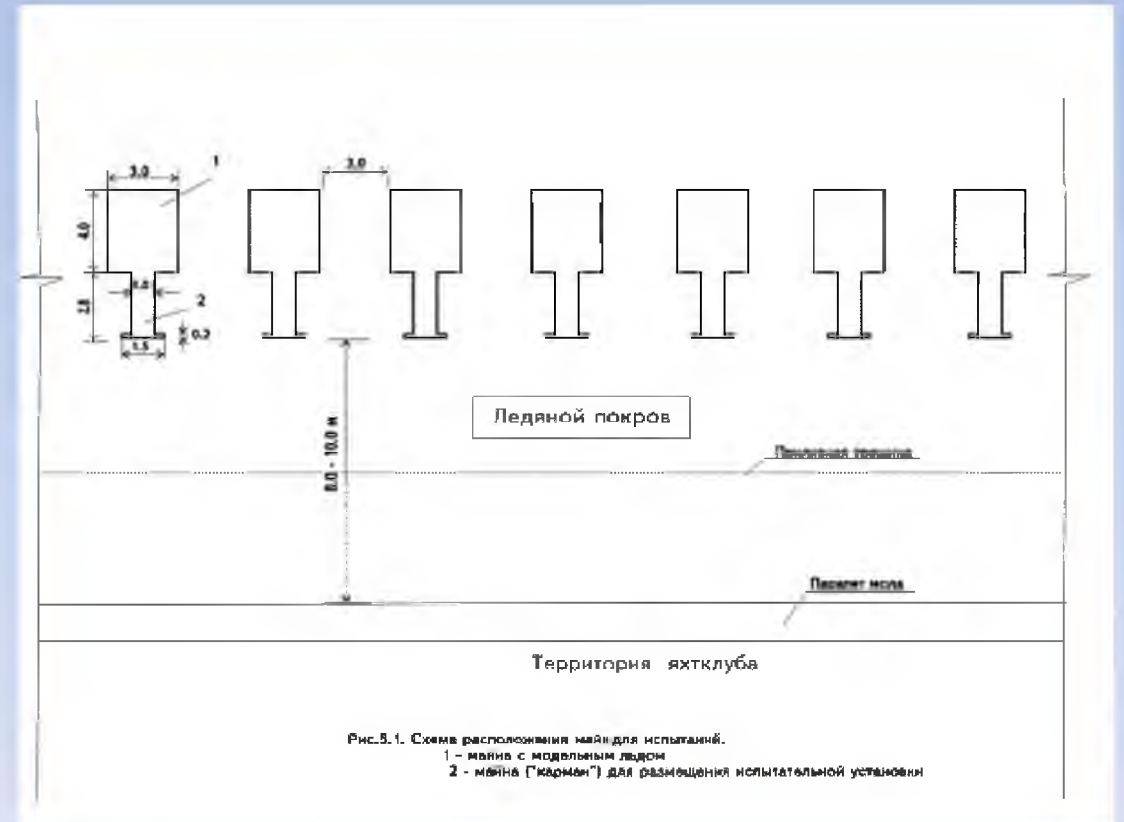


Схема расположения майн в ледяном покрове



Проведение эксперимента (1989-1990)



Запуск установки

Иногда надо и подумать



Регистрирующая аппаратура

Основные результаты полунатурных исследований

Результаты полунатурных исследований подтвердили теоретические разработки, а именно:

- характер разрушения ледяного поля,
- количественные параметры математической модели контактного разрушения ледяного поля и формирования динамической ледовой нагрузки:
 - угол скола;
 - частоту сколов ледяных призм;
 - частоту изменения ледовой нагрузки.

Выводы

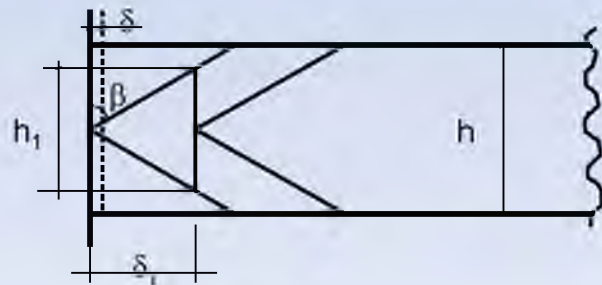
Исследования процесса разрушения ледяных полей на контакте с вертикальными опорами ГТС позволяют сделать следующие выводы:

1. Процесс разрушения ледяного покрова зависит от следующих факторов: скорости дрейфа, толщины льда, его прочностных характеристик, параметров сооружения.
2. Для целей усталостного анализа конструкций сооружений представляет интерес только хрупкий и квазихрупкий характер разрушения льда.
3. Предложена феноменологическая модель разрушения ледяных полей перед МЛП, предназначенная для целей определения режима нагружения сооружений ледяным покровом.
4. Получено выражение для определения частоты изменения ледовой нагрузки, которая необходима для определения количества циклов нагружения сооружений дрейфующим ледяным покровом.
5. Исследование частоты изменения ледовой нагрузки при его циклическом характере показало, что она зависит от толщины льда, геометрических размеров сооружения, скорости относительных деформаций льда в контактной зоне, прочности льда.

Феноменологическая модель разрушения ледяной плиты перед вертикальной опорой

Процесс разрушения льда происходит следующим образом. Первоначально, при сжатии льда по контакту на величину δ под действием давления P происходит сдвиг двух призм льда (нижней и верхней) под углом β . После этого, по мере продвижения ледяной плиты, начинает сминаться заостренная кромка льда на величину δ_1 до момента, пока вертикальный размер зоны контакта не достигнет h_1 . В этот момент значения давления P_1 и, соответственно, силы становятся достаточными для реализации сдвига очередных призм льда. Затем процесс повторяется с характерными параметрами δ_1 , h_1 , P_1 . Таким образом, наблюдается периодическое разрушение льда, нагрузка при этом изменяется циклически. Получено выражение для частоты разрушения льда f на контакте с сооружением:

Схема разрушения ледяной плиты на контакте с сооружением



Частота изменения ледовой нагрузки

$$f = 4 a \frac{d}{h} \frac{\sqrt[4]{\epsilon^5}}{\operatorname{tg}\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)}$$

Общая вероятностная модель формирования ледовых нагрузок и воздействий

Следствия принятых допущений

1. Время расчетной ситуации, определяется по формуле:

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

2. Время расчета с учетом вероятности столкновения определяется по формуле:

$$t_c = t_k \frac{N}{10 \cdot D_k^2} (D_k + D) \cdot (L_0 + D) \quad (2)$$

3. Начальное расстояние между ледяными образованиями определяется в соответствии со схемой

$$L_0 = \sqrt{\frac{D_k^2 \cdot 10}{N_k}} - D_k \quad (3)$$

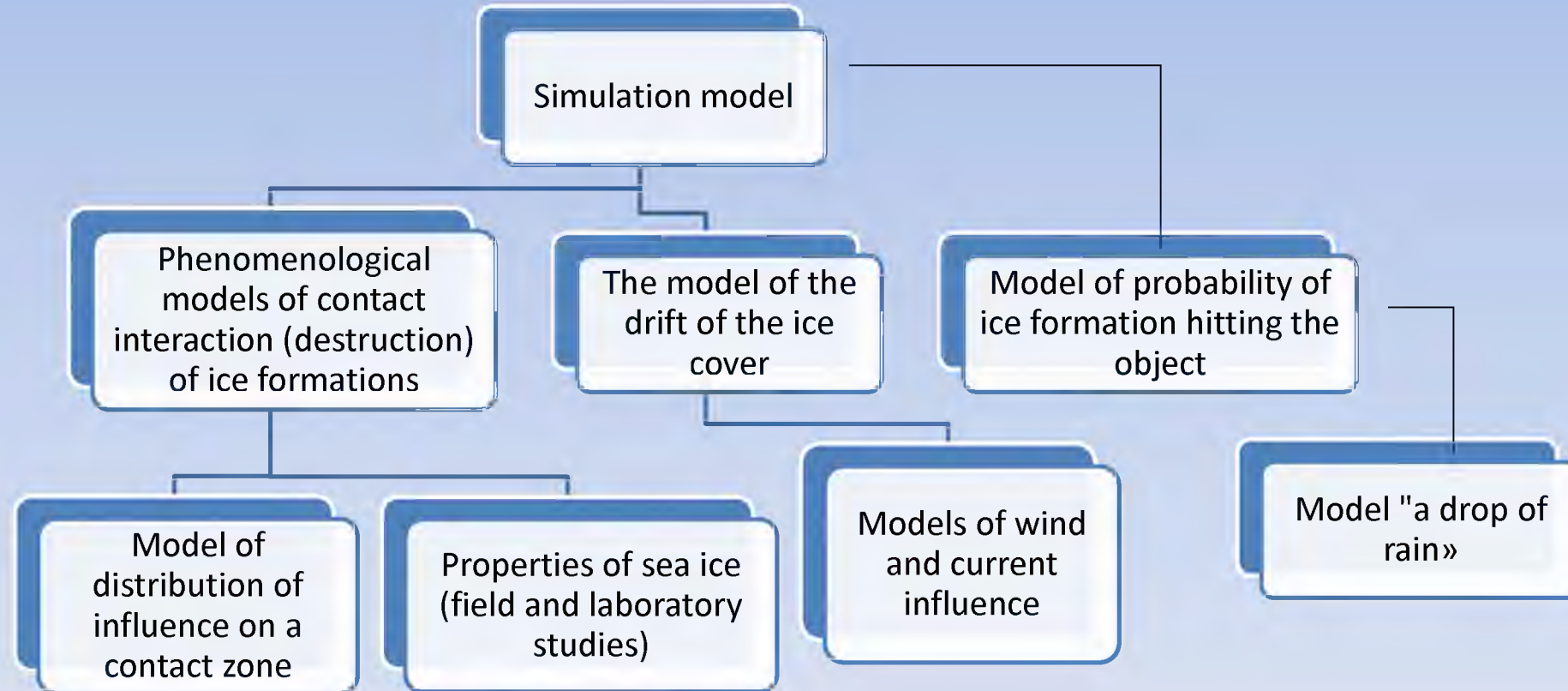
Математические модели процессов формирования ледовых воздействий на МНГС

На основе предложенной концепции и принятых допущений были разработаны ряд основополагающих математических моделей:

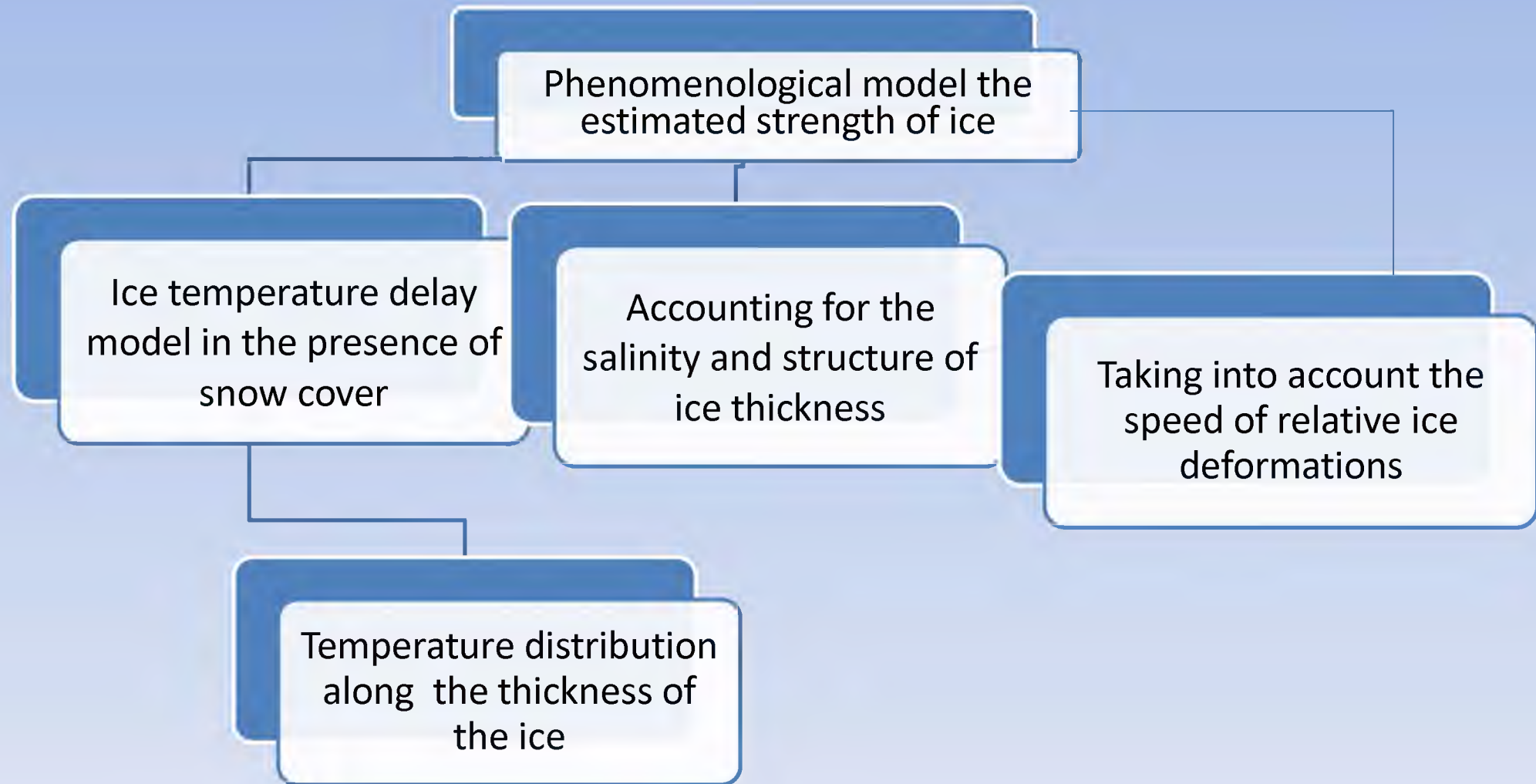
- общая вероятностная имитационная модель дрейфующего ледяного покрова,
- вероятностные модели формирования расчетных ситуаций,
- детерминированные модели процессов разрушения ледяных образований и формирования ледовых нагрузок и воздействий на МНГС,
- модели воздействия торосов на подводные трубопроводы,
- модели обледенения конструкций и формирования ледовых нагрузок в условиях большой амплитуды колебания уровня моря,

Имитационная модель дрейфующего ледяного покрова и его воздействий на МНГС, основана на численном моделировании функций распределения параметров ледового режима и имитации всех возможных ситуаций, формирующихся случайным сочетанием значений этих параметров, и др.

Иерархия математических моделей расчета на постепенных отказ



Моделирование прочности льда



Вероятностный анализ ледовых нагрузок

Экстремальные нагрузки:

- Экстремальные размеры ледяных полей
- Торосы
- Айсберги
- Комбинации

Не экстремальный анализ:

- Усталость материалов
- Истирание
- Коррозия
- Комбинации

Влияние пространственной неоднородности ледяного покрова на расчетные значения ледовых нагрузок на морские ГТС

Идея программы испытаний

Идея такой оценки появилась в 1996 г. и превратилась в реальную программу по обоснованному снижению проектных значений ледовых нагрузок. Для ее подтверждения была разработана методика проведения натурных экспериментов на ледяном покрове:

Bekker A.T. Program of Experimental Study of the Three-Dimensional Ice Strength Distribution for Ice Force Analysis // Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference: Proceedings of the 1996 6th International Offshore and Polar Engineering Conference. Part 2 (of 4). – Los Angeles, 1996. - P. 340-342.

По предложенной методике были выполнены многолетние натурные исследования пространственного распределения свойств ледяного покрова, которые полностью подтвердили идею неравномерного распределения прочностных свойств ледяного покрова и возможность снижения проектных значений на сооружение.

Исследования в этом направлении продолжаются: подготовлены рекомендации для внесения в нормативный документ по уточнению определения ледовых нагрузок на сооружения с понижающим коэффициентом, учитывающим пространственную неоднородность ледяного покрова.

Постановка задачи

Основная гипотеза:

ледяной покров имеет неоднородность не только по толщине, но и в плане.

Метод оценки:

коэффициент неоднородности: $K = R_{cp} / R_{max}$

Методика экспериментальных исследований

- Одновременное определение прочности льда (экспресс-метод)
- Специальная методика разметки полигона;
- Зачистка поверхности ледяного покрова в точке определения прочности;
- Многолетние исследования;
- Рекомендации по снижению ледовой нагрузки введением коэффициента неоднородности.

Результаты экспериментальных исследований

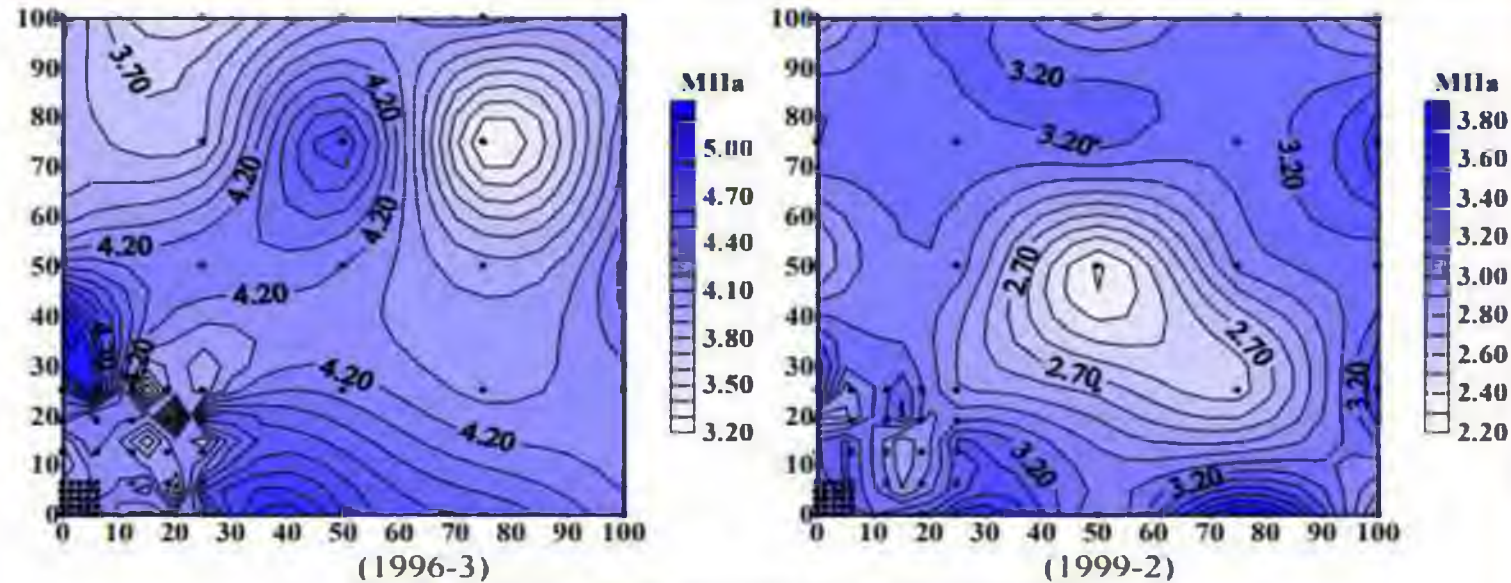


Fig. 3. Distribution of strength by polygons

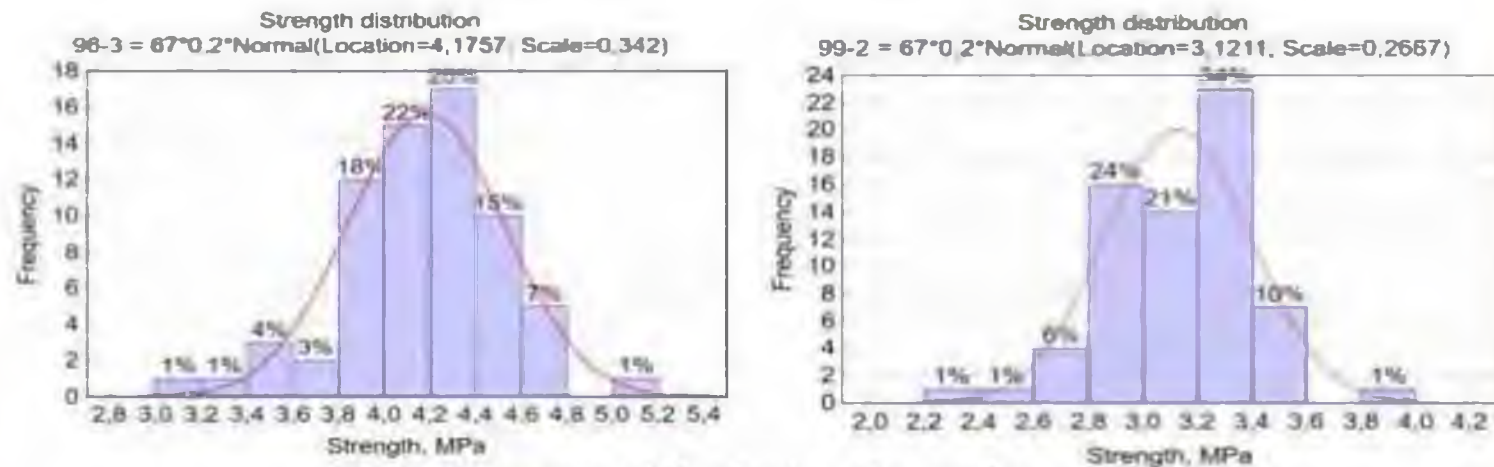
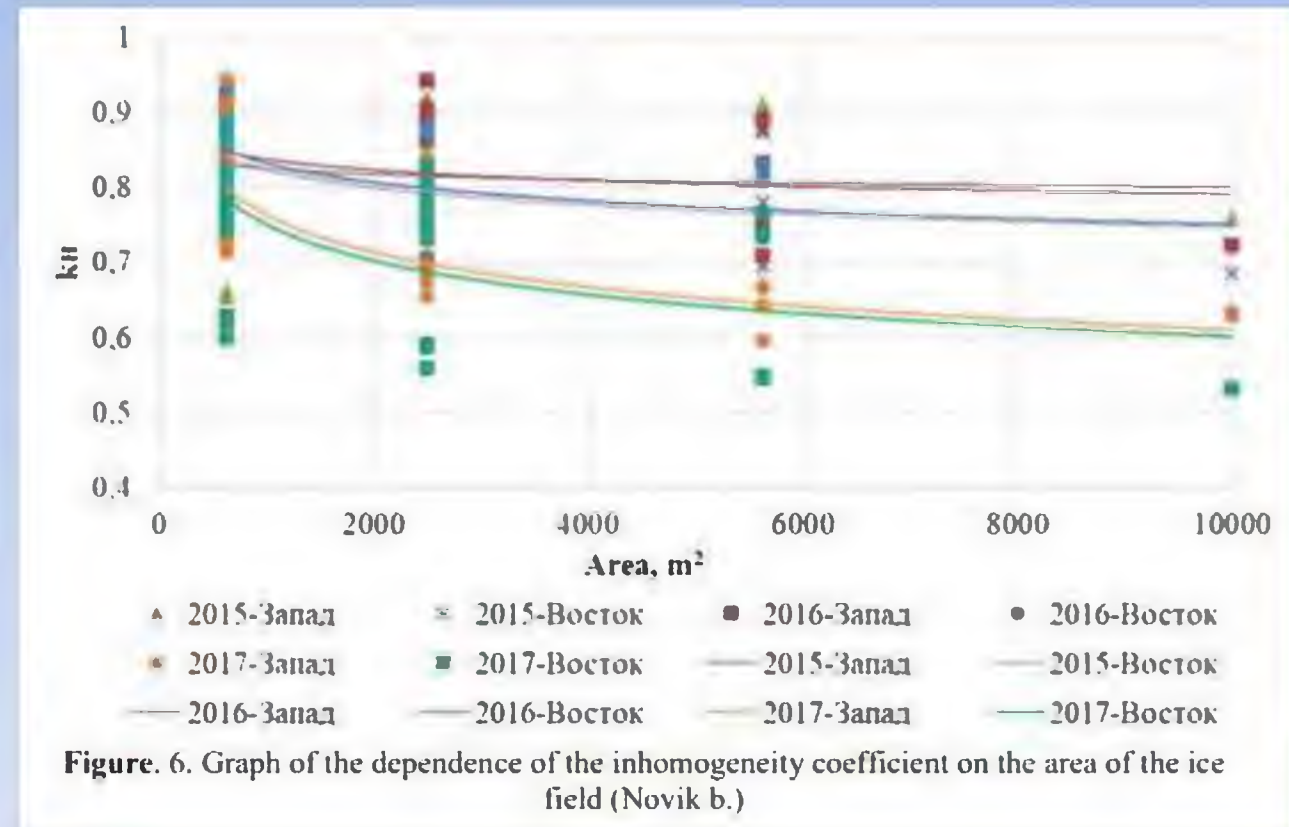
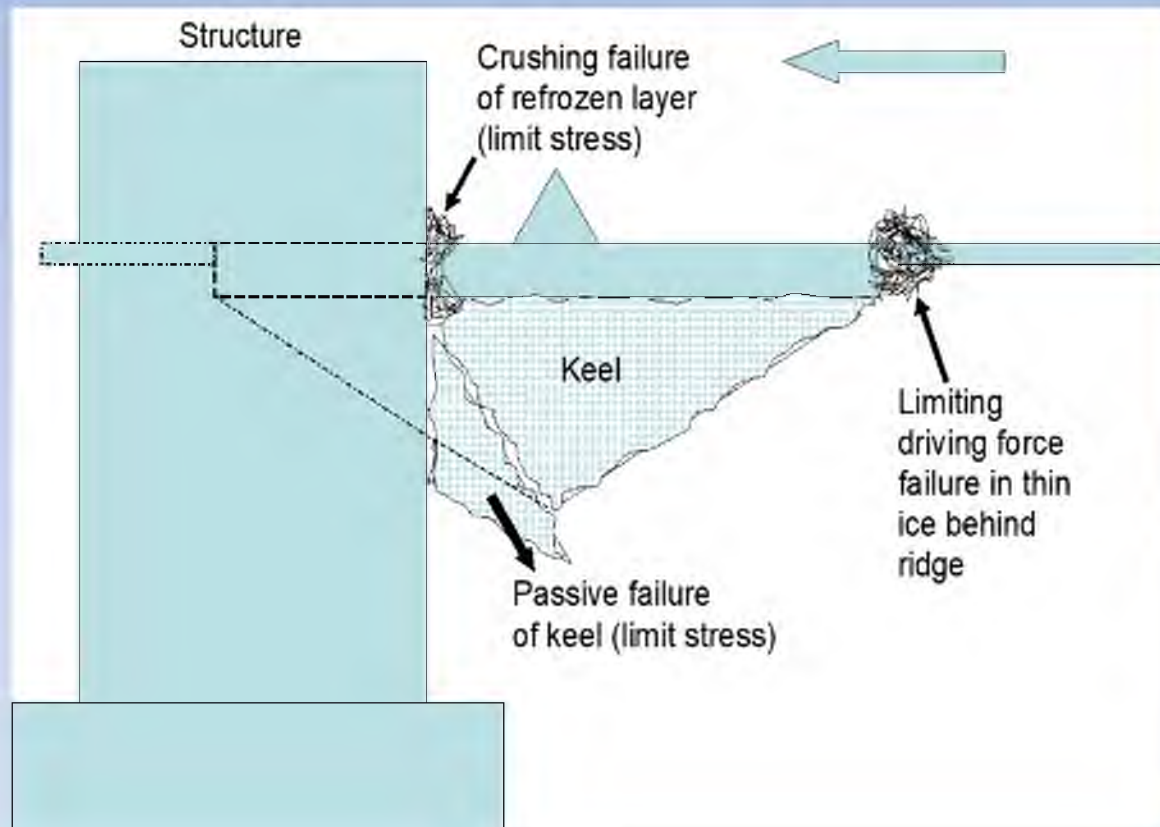


Fig. 4. Histograms of distribution of strength to polygons

Графики зависимости коэффициента неоднородности от площади ледяного покрова



Основные выводы

- Предложенный подход позволяет учесть пространственную неоднородность прочностных свойств ледяных полей, что позволяет обосновать снижение проектной ледовой нагрузки на МНГС.
- Многолетние исследования неоднородности прочностных свойств ледяных полей позволяют получить статистические данные для количественной оценки степени снижения проектной прочности ледяных полей в различных акваториях.
- По предложенной методике были выполнены многолетние (9 лет) натурные исследования пространственного распределения свойств ледяного покрова, которые полностью подтвердили идею неравномерного распределения прочностных свойств ледяного покрова и возможность снижения проектных значений на сооружение.
- Дальнейшие исследования позволят ввести в нормативные документы понижающий рекомендации по снижению проектной прочности ледяных полей и, соответственно, ледовых нагрузок на МНГС.

Исследование торосов и их воздействий на морские нефтегазовые сооружения и подводные коммуникации

Разработана математическая модель процесса разрушения тороса при контактном взаимодействии с сооружением и модель формирования ледовых нагрузок на МНГС от торосов, основанная на методе статистического моделирования Монте-Карло.

Методика включает получение вероятностного распределения экстремальной ледовой нагрузки от торосов для расчета проектной надежности сооружений на внезапный отказ. Выполнен анализ экстремальных распределений применительно к ледовым нагрузкам.

Впервые разработан вероятностный подход для определения оптимальной трассы пространственного положения конструкций подводного трубопровода с учетом величины его заглубления в грунт, рельефа дна и обеспечения требуемого уровня надежности трубопровода. Методика расчета базируется на методах численного и статистического моделирования. Учет рельефа дна осуществляется с применением ГИС-технологий.

Исследование торосов и их воздействий на морские ГТС

Факторы, влияющие на нагрузки от торосов:

- Размеры консолидированной части тороса, его киля и паруса;
- Прочностные характеристики консолидированной части, киля и паруса;
- Скорость дрейфа тороса;
- Размеры сооружения.

Размеры торосов достигают сотен метров, их масса – миллионов тонн.



Расчет ледовой абразии

Воздействие на сооружение

Сопротивление материала

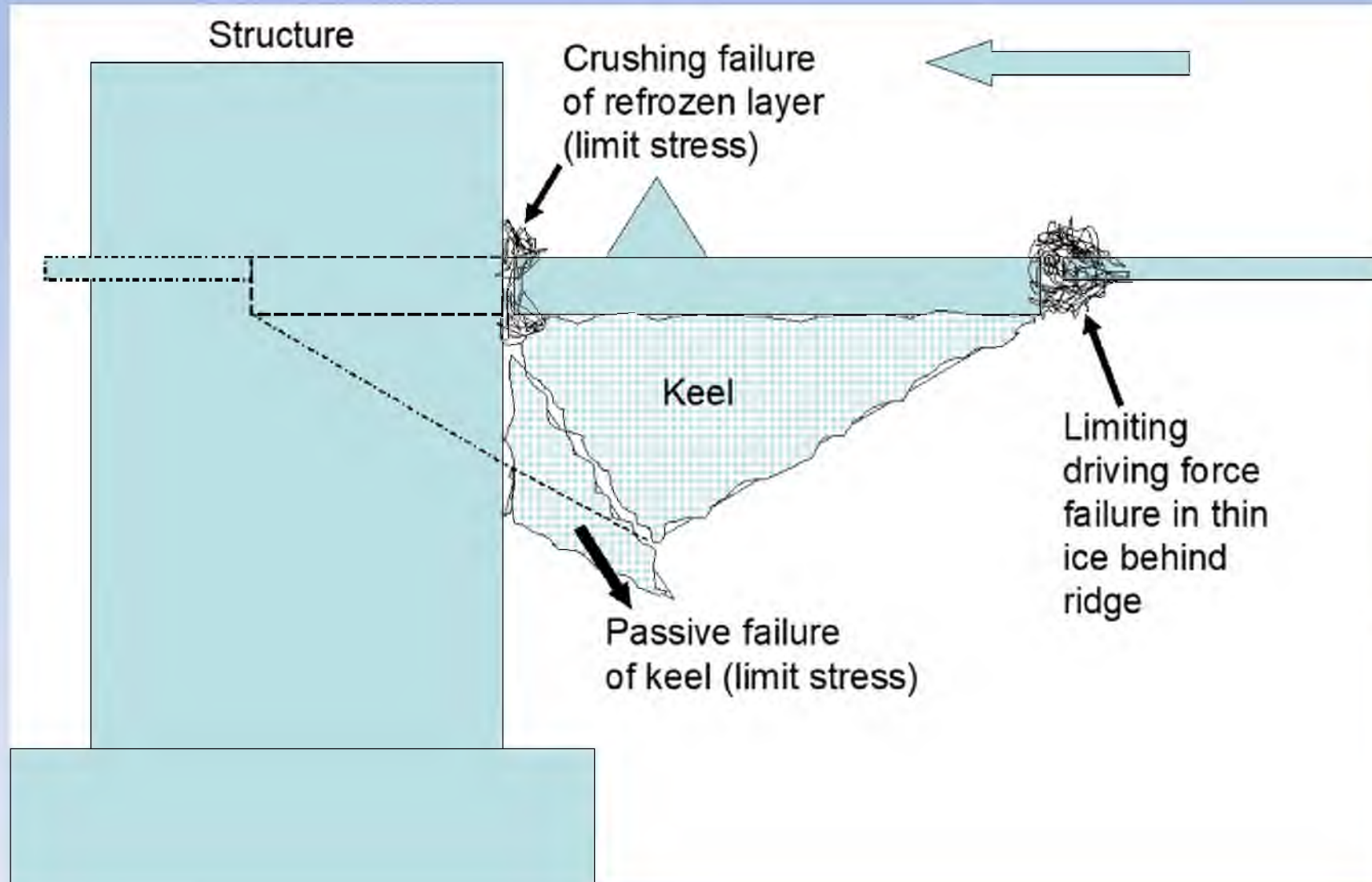
Экспериментальные
исследования

Теоретические
исследования

Экспериментальные
исследования

Теоретические
исследования

Схема разрушения тороса на контакте с МНГС и формирование ледовой нагрузки



Воздействие торосов и айсбергов на подводные коммуникации

Проблемы развития трубопроводной сети в шельфовой зоне арктических морей связаны с опасностью разрушения трубопроводов и других линейных подводных инженерных сооружений дрейфующими торосами и айсбергами. Как показывает мировой опыт проектирования систем обустройства нефтегазовых месторождений, выбор и обоснование расчетной трассы трубопровода зависит не только от ледовых условий, но и от физико-механических характеристик грунтов основания, рельефа дна, положения относительно берега, протяженности трассы, технических, технологических и экономических факторов и т.п.

Разработана математическая модель внедрения торосов в грунт дна, основанная на энергетическом подходе, и получено решение для глубины пропахивания килем тороса морского дна (1987):



Схема взаимодействия
тороса с дном



где m – масса торосистого образования, с учетом массы примыкающего ледяного поля и присоединенной массы воды, т;
 v – начальная скорость движения торосистого образования, м/с;
 β – угол наклона подошвы килея к горизонту в поперечном сечении.

Исследования абразионного износа конструкций МНГС дрейфующим ледяным покровом

Это воздействие дрейфующих ледяных образований на сооружение, вызывающее разрушение поверхности материала конструкции



Состояние проблемы

Проблема оценки истирающих воздействий от дрейфующего ледяного покрова на МНГС обусловлена:

- многообразием и сложностью процессов разрушения ледяных образований при взаимодействии с сооружением,
- высокой степенью изменчивости физико-механических характеристик морского льда,
- недостаточным объемом натурных данных по ледовой абразии,
- слабой изученностью износостойкости материалов против ледовой абразии.

Анализ проблемы ледовой абразии (истирания) строительных конструкций показал, что она включает две принципиально различные проблемы:

- **интенсивность и продолжительность ледовых истирающих воздействий на строительные конструкции за весь период их эксплуатации;**
- **степень сопротивления материалов строительных конструкций ледовым истирающим воздействиям.**

Решение первой проблемы основано на использовании разработанного математического аппарата имитационного моделирования процессов формирования факторов ледовых истирающих воздействий в каждой точке контактной зоны: локального давления σ , температуры льда T и относительной скорости взаимодействия $\dot{\epsilon}$, которые необходимо накапливать за весь период эксплуатации МНГС, и учитывать их распределение по поверхности конструкции сооружения с учетом случайного характера явления. Были разработаны математические модели истирающих воздействий различных ледяных образований.

Экспериментальные исследования сопротивления материала ледовой абразии.

Разработанная имитационная модель формирования ледовых нагрузок является универсальной.

На ее основе можно моделировать в вероятной постановке процессы формирования ледовых нагрузок и воздействий от различных видов ледяных образований.

Этот подход был использован и для описания процессов формирования **ледовых истирающих воздействий**, которые необходимо накапливать за весь период эксплуатации МНГС, и учитывать их распределение по поверхности конструкции сооружения с учетом случайного характера явления. Были разработаны математические модели истирающих воздействий различных видов ледяных образований.

Однако истирание конструкций сооружений зависит не только от **ледовых воздействий**, но и от **сопротивления материалов конструкций ледовой абразии**.

Учитывая сложность математического описания явления истирания материалов, был разработан экспериментальный подход. Разработана методика экспериментальных исследований и построении эмпирической модели сопротивления материала ледовой абразии.

Оценка степени сопротивления материалов строительных конструкций ледовым истирающим воздействиям

Вторая проблема связана со свойствами материалов конструкции. Учитывая сложность математического описания явления истирания материалов, отсутствием математических моделей процессов трения, был разработан эмпирический подход к решению проблемы. Разработана методика специальных экспериментальных исследований и получении эмпирической модели сопротивления материала ледовой абразии, имеющей вид:

$$\delta = f(\sigma, T, V),$$

где δ – интенсивность истирания материала в точке контактной зоны при прохождении 1 км пути контактного взаимодействия;

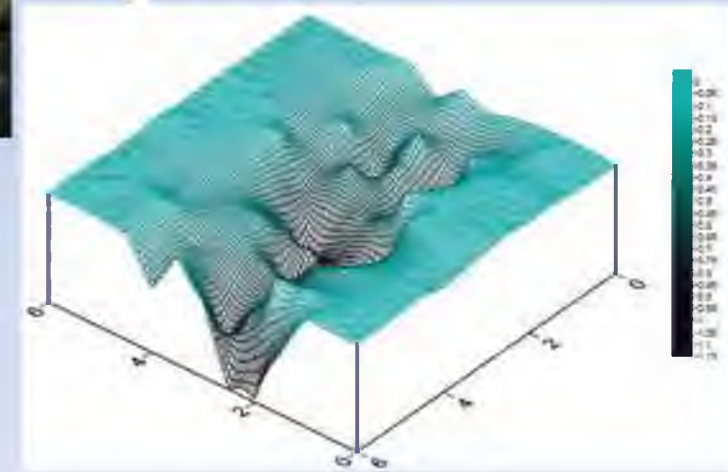
σ - локальное давление;

T - температура льда;

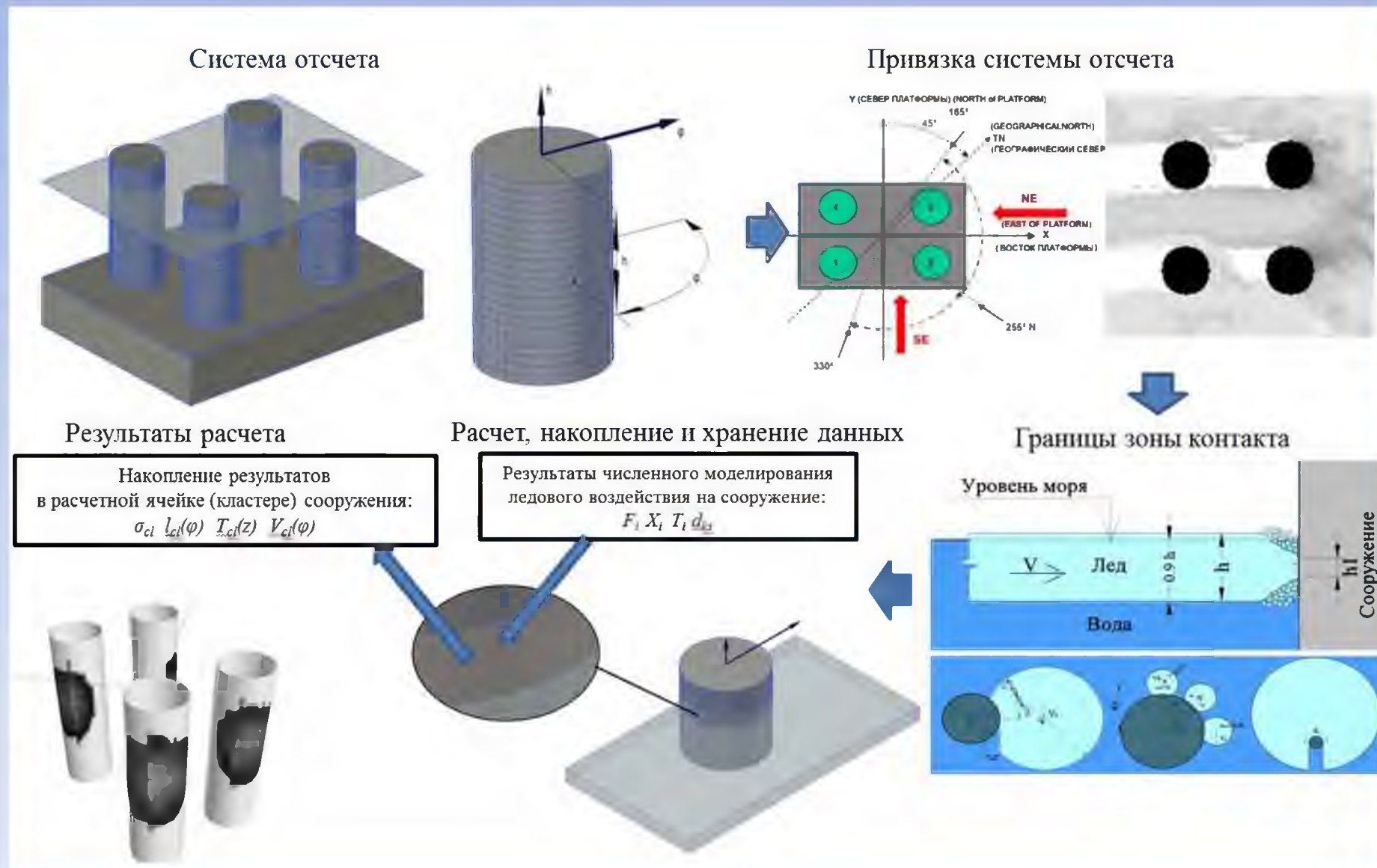
V - относительной скорости взаимодействия.

Испытания бетона на сопротивление ледовой абразии

Стенд для испытаний материалов на
сопротивление ледовой абразии



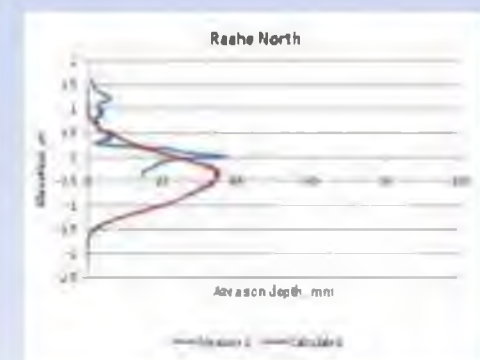
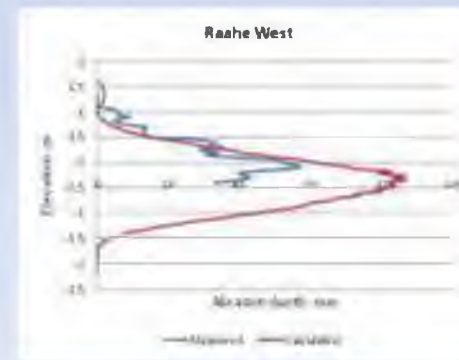
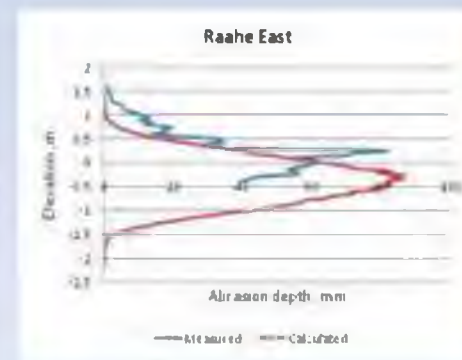
Алгоритм расчета воздействия от одного из видов ледяных образований



Основные результаты исследований

Для решения проблемы оценки ледовой абразии конструкций МНГС были получены новые научные результаты, разработаны следующие математические модели и методики:

- концептуальная модель ледовой абразии;
- модели процессов формирования ледовых истирающих воздействий от различных видов ледяных образований;
- способ оценки сопротивления материала ледовой абразии и методика проведения испытаний;
- методика планово-высотного распределения ледовых воздействий в контактной зоне со льдом;
- модель расчета глубины ледовой абразии;
- методика расчета глубины ледовой абразии, реализованная в виде расчетно-программного комплекса «IceStrIn» (Ice Structure Interaction).



Комплекс компьютерных программ "ICE – Structure Interaction"



Верификация комплекса моделей и методик по ледовой абразии материалов

Для верификации математических моделей и методики расчета глубины ледового истирания конструкций были использованы результаты наблюдений в течение 44 лет за ледовой абразией конструкций **трех маяков** в Ботническом заливе (Балтийское море).

Компьютерное моделирование выполнялось для ледовых условий этого района, а эмпирические модели сопротивления материалов определялись на образцах бетона, отобранных из выбуренных из конструкции маяков кернов.

Например, для бетона маяка «Oulu 2» эта модель имеет вид:

$$\delta = 0.588 \cdot \left(\frac{|T|}{\sigma} \right)^{-0.6143} \cdot 0.0202 \cdot V^{-0.4253}$$

Финские маяки в Ботническом заливе – база для верификации методики



Есть результаты наблюдений за ледовой абразией в течение 44 лет



RAAHE
64 39,1 N 24 13,6 E

OULU 2
65 10,5 N 24 35,5

OULU 3
65 08,8 N 24 39,7 E

Верификация разработанных моделей и методик для определения глубины ледовой абразии материалов

Компьютерное моделирование выполнялось для ледовых условий этого района, а эмпирические модели сопротивления материалов определялись на образцах бетона, отобранных из выбуренных из конструкции маяков кернов.

Например, эмпирическая модель сопротивления ледовой абразии бетона маяка Oulu 2 (Ботнический залив) имеет следующий вид:

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

где δ_{aver} - интенсивность ледовой абразии материала, мм/км;

T - температура льда, С°;

σ - нормальное давление на контакте "лед-материал", МПа.

Глубина ледовой абразии для маяка Oulu 2



Коэффициент корреляции по всей выборке значений составил $0,78 \pm 0,02$.

Реализация результатов исследований ледовой абразии

Научно-техническое сопровождение
проектирования и строительства защитного
противоледового пояса ОГТ
платформы «Беркут» (проект Сахалин 1)

Проблема защиты МНГС Лунская и Пильтун-Астохская от ледовой абразии

2003–2005 гг. - научно-техническое сопровождение проектирования и строительства конструкций сухого дока (уникальное сооружение) для строительства двух железобетонных конструкций оснований морских нефтегазовых платформ для шельфа Охотского моря (проект Сахалин 2)



Разрушение защитного пояса МНГС Лун А и ПА-Б дрейфующим ледяным покровом

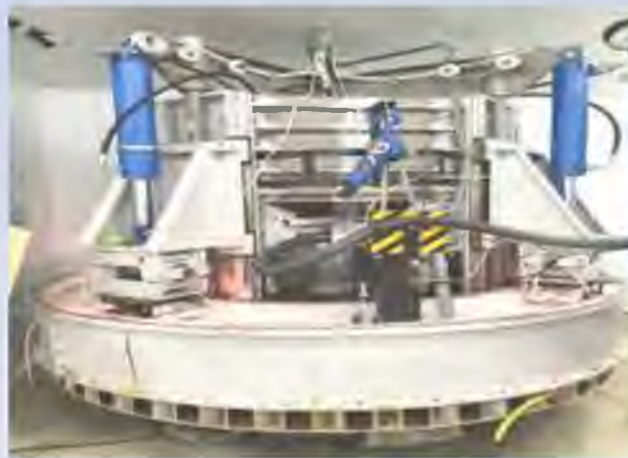
Строительство оснований гравитационного типа (ОГТ) МНГ платформ ЛУН-А и ПА-Б в сухом доке порта Восточный в Приморском крае (2003-2005)



Буксировка ОГТ Лун А на место установки на шельфе Охотского моря



В условиях отсутствия достаточного опыта эксплуатации МНГС в морях с высокой динамичностью ледяного покрова платформы для Лунского и Пильтун-Астохского месторождений шельфа о. Сахалин (проект Сахалин 2) были оборудованы стальными (специальная нержавеющая сталь) ледозащитными оясами в зоне действия ледовой нагрузки. Однако на второй год эксплуатации стальные ледозащитные пояса начали разрушаться.



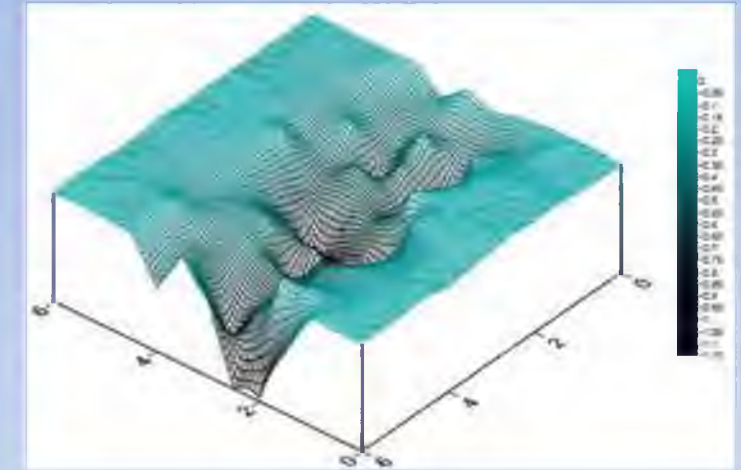
Эмпирическая модель бетона понтона СПГ 2 ледовому истиранию

Бетонный образец после испытаний

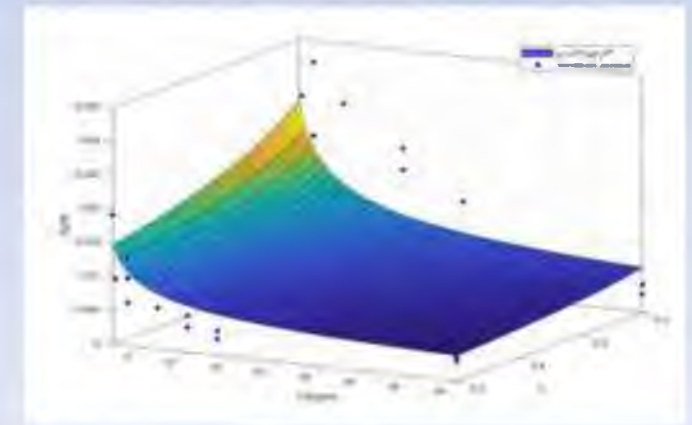
Основные этапы определения глубины ледовой абразии

- Адаптация математических моделей к режиму эксплуатации объекта и граничным условиям
- Обработка экспериментальных данных и получение **эмпирической модели сопротивления материала ледовой абразии**
- Численное моделирование процесса формирования глубины ледовой абразии за весь период эксплуатации

Испытательного стенда



Эмпирическая модель сопротивления
бетона ледовой абразии



Защитный пояс платформы «Беркут»



2009-2010 гг. – научно-техническое сопровождение проектирования и реконструкции сухого дока (уникальное сооружение) для строительства железобетонных конструкций оснований МНГС для шельфа Охотского моря (проект Сахалин 1)

Опытный образец ледозащитного устройства Масштаб 1:1



Результаты исследований были внедрены при проектировании и строительстве железобетонной конструкции основания нефтедобывающей платформы "Беркут" для освоения Аркутун-Дагинского месторождения нефти на шельфе Охотского моря (2012, управляющая компания "ЭксонМобил").

Гравитационное основание платформы «Беркут» в сухом доке в порту «Восточный»



Доказанная экономия составила 2,1 млрд. рублей.

Участие ДВФУ в Сахалинских проектах

Годы	Исследования и разработки
1975	Открытие первых месторождений нефти и газа;
1980	Обращение компании «Сахалинморнефтегазпром» к ДВПИ за научно-технической поддержкой
1980 - 1992	Участие в исследованиях и разработках первых проектов СССР по обустройству месторождений нефти и газа на континентальном шельфе Охотского моря (Заказчик «Сахалинморнефтегазпром»);
2000	Обследования и изыскания 7 портов Сахалина и акватории на глубинах до 300 м;
2003	Разработка проекта сухого дока для строительства двух оснований гравитационного типа (ОГТ) платформ Лунского и Пильтун-Астохского месторождений нефти
2003-2005	Авторский надзор за строительством и эксплуатацией сухого дока в порту «Восточный»;
2005	Установка двух ледостойких платформ «Лунская А» и Пильтун-Астохская» (РА-В) (Проект Сахалин 2);
2010	Разработка проекта реконструкции сухого дока в порту «Восточный» для строительства ОГТ платформы «Беркут»;
2010	Авторский надзор за реконструкцией сухого дока в порту «Восточный»;
2009-2010	Разработка защиты опорных конструкций платформы «Беркут» от ледовой абразии (заказчик - компании Квернер и ЭксонМобил – генподрядчик и оператор проекта) платформ Лунская – А и ПА-Б;
2010-2012	Научно-техническое сопровождение строительства ОГТ платформы «Беркут» в сухом доке;
2006	Разработка проекта берегозащитного сооружения в районе залива «Чайво»
2012	Установка ледостойкой платформы «Беркут» на месторождении Чайво (проект Сахалин 1);
2019	Разработка концептуального проекта базы обеспечения платформ «Орлан» и «Беркут» (заказчик - ЭксонМобил)
2020	Разработка рекомендаций по берегоукреплению побережья в районе «Одопту» (заказчик – ЭксонМобил)

Sakhalin Projects



FEFU
 FAR EASTERN
 FEDERAL
 UNIVERSITY

Надводные и береговой добывающие комплексы на континентальном шельфе Охотского моря

ORLAN (Chayvo field)



LUN-A (Lunskoe field)



PA-A (Piltun-Astokskoe field)



Береговой комплекс (Chayvo field)



Berkut (Arkutun-Dagi field)



PA-B (Piltun-Astokhskoye field)



Научно-техническое сопровождение проектирования защитного противоледового пояса ОГТ заводов СПГ (проект Ямал СПГ 2)

Проект морского порта сжижения и отгрузки СПГ
в Обской губе (Проект СПГ 2, Новатэк)

Наплавные СПГ в проектном положении в Обской губе

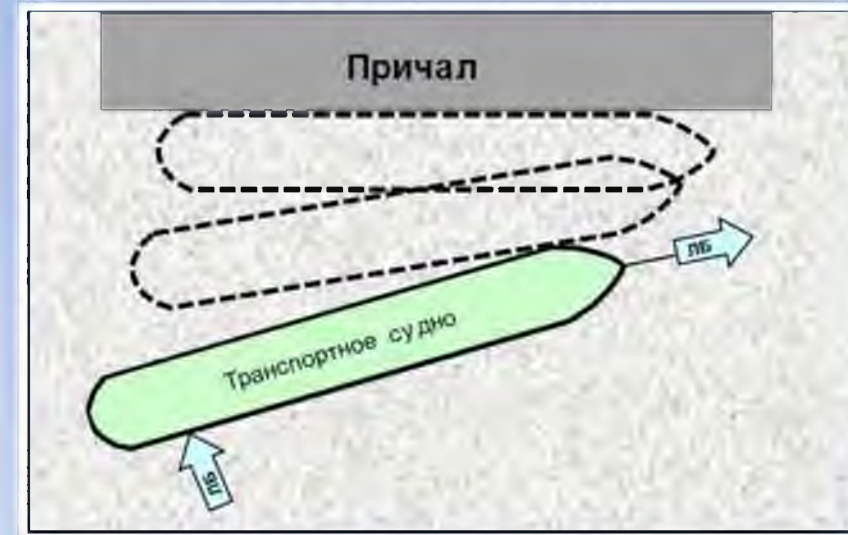


Схемы учета воздействия льда

Расположение LNG-терминалов



Схема швартовки газовозов к LNG-терминалу



Направления дрейфа ледяного покрова



Научно-техническое сопровождение проектирования железобетонных конструкций оснований гравитационного типа наплавных заводов-причалов для сжижения и отгрузки природного газа (проект СПГ 2, 2019 – 2021 гг.)



Строительство наплавного завода СПГ в сухом доке в Мурманске



Проект вывода завода СПГ из дока

Исследования морского льда как среды формирующей ледовые нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения

Годы	Исследования
1970-е	первые комплексные исследования морского льда на тихоокеанском побережье
1980-1992	Исследования конструкций морских нефтегазовых сооружений (МНГС), технологий их изготовления, методик расчета ледовых нагрузок и надежности конструкций платформ в интересах компании «Сахалинморнефтегаз». Участие в разработке первых проектов МНГС для условий Охотского моря. Математическая постановка вероятностного подхода к описанию дрейфующего ледяного покрова и определению вероятностного распределения ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа.
1989 - 1990	Проведение полунатурного эксперимента по моделированию процесса формирования ледовой нагрузки на цилиндрический индентор. Разработка феноменологической модели разрушения ледяного поля на контакте с опорой
1990-е	Разработка методики расчета МНГС на внезапный отказ. Разработка имитационной и численных моделей реальных процессов разрушения ледяных образований завесь период эксплуатации сооружения для расчета надежности МНГС на постепенный отказ (усталость, ледовая абразия). Разработка методики и оборудования для оценки степени сопротивления материалов ледовой абразии.
2009-2010	Верификация математических моделей и методики расчета глубины ледовой абразии материалов опорных конструкций МНГС.
2010-2012	Внедрение результатов исследований ледовой абразии при проектировании и строительстве ОГТ платформы «Беркут» (Сахалин 1).
2016-2019 г	Экспедиционные исследования ледяных образований и морского льда по заказам ПАО «НК «Роснефть»: в море Лаптевых, Охотское море, Японское море.
2019-2020	Исследования глубины истирания ОГТ заводов по сжижению природного газа проекта СПГ 2 (НОВАТЭК)
2020	Ежегодная Зимняя школа «Ледовая механика» в бухте Новик о. Русский

Участие ДВФУ в целевых инновационных проектах ПАО «Роснефть»

- 2015-2016 гг. Создание базы данных параметров окружающей среды и морских грунтов на лицензионных участках арктического и дальневосточного шельфа ПАО «НК «Роснефть»
- 2016-2017 гг. «Разработка отдельных элементов системы арктического инжиниринга для лицензионных участков ПАО «НК «Роснефть» на шельфе северных морей: Баренцево, Карское, Восточно-Сибирское, Лаптевых, Чукотское, Охотское»
- 2017-2018 гг. «Разработка и верификация отдельных элементов системы арктического инжиниринга. Оценка геокриологических условий на акватории Хатангского лицензионного участка посредством проведения инженерно-геологического бурения с припая»
- 2018-2019 гг. «Разработка методических рекомендаций по учету прочностных свойств различных типов ровного льда для определения ледовых нагрузок»
- 2019-2020 гг. «Проведение экспедиционных исследований «Прочный лед 2020»

География экспедиций



Экспедиционные исследования ледового режима континентальных шельфов арктических морей

Программы полевых исследований

- определение толщины, плотности снега
- определение толщины, температуры, солёности, глубины погружения льда
- содержание жидкой фазы в образце льда
- определение плотности, текстуры льда
- определение прочности льда на центральный изгиб
- определение локальной прочности льда при различных скоростях нагружения
- определение прочности образцов на сжатие перпендикулярно поверхности намерзания
- определение прочности образцов на сжатие параллельно поверхности намерзания
- определение коэффициента трения льда по различным поверхностям
- определение модуля упругости льда
- прочность ледяных консолей
- геометрические характеристики торосистых образований
- распределение температуры льда в торосистом образовании

Цели проведения исследований

- Разработка методических рекомендаций по учету прочностных свойств различных типов ровного льда для определения ледовых нагрузок и разработка предложений по совершенствованию соответствующей отечественной нормативной базы
- Рекомендации по пересчету прочностных параметров ледяного покрова
- Обеспечение данными о свойствах деформированного льда при проектировании морских гидротехнических сооружений для корректного учета ледовых нагрузок



Технология обеспечения безопасности разведочного бурения на арктическом шельфе

Постановка проблемы

- Выполнение работ традиционными методами возможно в Арктике только в период чистой воды.
- Продолжительность безлёдного периода в некоторых районах Арктики менее периода, необходимого для выполнения разведочных буровых работ.
- Применение традиционных способов выполнения буровых работ СПБУ, ПБУ, буровое судно в условиях воздействия льда возможно только при ограничении максимальной толщины льда (намного ниже тех, что могут встречаться в Арктике)
- Определение периода времени, в который будет возможно выполнения работ, включает оценку:
 - естественных условий;
 - характеристик конструкции.

Обеспечение разведочных буровых работ в арктических условиях

В настоящее время одной из основных проблем в Арктике является проведение разведочного бурения в условиях короткого навигационного периода, не позволяющего пробурить даже одну разведочную скважину существующими средствами (МНГС).

Традиционные способы проведения разведочных работ неприемлемы, т.к. они не могут работать в ледовых условиях.

- Численное моделирование и испытания моделей конструкций в крупнейшем в РФ ледовом бассейне позволили разработать методику определения допустимого «окна» буровых работ в ледовых условиях с учетом несущей способности существующих МНГС и предлагаемых МНГС с новыми конструктивными решениями.

Для реализации поставленной задачи выполнены следующие работы:

- Проведен комплексный и всесторонний анализ факторов, оказывающих влияние на морские буровые установки в условиях Арктики;
- Выполнен анализ рисков возникновения чрезвычайных ситуаций при производстве морских операций;
- Выполнено численное моделирование с применением различных расчетных комплексов;
- Выполнено физическое моделирование в ледовом бассейне воздействий ледяного покрова на буровые установки и судно;
- Проведено сопоставление результатов численного моделирования с результатами испытаний в ледовом бассейне.

Общая схема выполнения работ

Численное моделирование ледовых и волновых воздействий на различные технические средства



Испытания в ледовом бассейне



Анализ естественных условий

Численное моделирование

Характеристики ледяного покровы, при которых возможно применять сооружения

Оценка продолжительности проведения работ

Численное моделирование взаимодействия сооружений со льдом



КЭ модель СПБУ

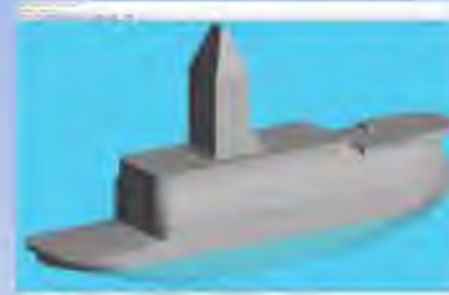


Рисунок 3.1 – Геометрическая

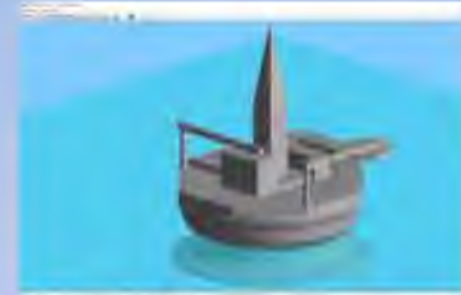


Рисунок 3.2 – Трехмерная



Рисунок 3.13 – Взаимодействие

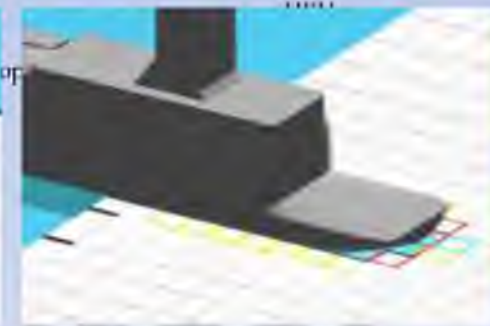


Рисунок 3.14 – Взаимодействие бурового судна



Рисунок 3.15 – Начальная фаза



Рисунок 3.16 – Завершающая фаза

взаимодействия по ровного льда
толщиной 30 см, движущегося со скоростью

0,5 м/с, с корпусом судна

взаимодействия (обрыв связей)

КЭ модели ППБУ и БС

Обеспечение разведочных буровых работ в арктических условиях

- Впервые разработаны методы проектирования строительных конструкций морских буровых платформ, новые методики и технологии увеличения продолжительности эксплуатации морских нефтегазовых сооружений в замерзающих морях.
- Методика позволяет провести сравнение различных типов конструкций и определение граничных параметров ледовых условий, в которых эксплуатация буровых платформ невозможна из-за наступления внезапного отказа.
- Разработаны новые конструкции морских сооружений для обеспечения портовой и шельфовой инфраструктуры Арктики.
- Разработаны рекомендации по совершенствованию отечественных нормативных документов в области определения ледовых нагрузок на строительные конструкции.

Участие ДВФУ в решении проблем освоения ресурсов континентальных шельфов Арктики

Фундаментальные и прикладные исследования (внебюджетные)

- 2015-2016** - НИР «Создание базы данных параметров окружающей среды и морских грунтов на лицензионных участках арктического и дальневосточного шельфа» **«НК «Роснефть»**
- 2016-2017** – НИР «Разработка отдельных элементов системы арктического инжиниринга для лицензионных участков ПАО «НК «Роснефть» на шельфе северных морей: Баренцево, Карское, Восточно-Сибирское, Лаптевых, Чукотское, Охотское» **«НК «Роснефть»**
- 2017-2018** – НИР «Оценка геокриологических условий на акватории Хатангского лицензионного участка посредством проведения инженерно-геологического бурения с припая» **«НК «Роснефть»**
- 2018-2019** – НИР «Разработка методических рекомендаций по учету прочностных свойств различных типов ровного льда для определения ледовых нагрузок» **«НК «Роснефть»**
- 2019-2020** – НИР «Проведение экспедиционных исследований «Прочный лед 2020» **«НК «Роснефть»**
- 2019-2021** – НИР «Оценка глубины ледовой абразии ОГТ завода СПГ (проект СПГ 2, **НОВАТЭК**, Обская губа)

НИОКР и инновационные разработки ДВФУ

- 1980-1992** – Исследования ледового режима акваторий и морского льда, конструкций МНГП и технологий строительства в открытом море;
- 1999-2003** – НТС проектирования и строительства базы снабжения МНГП (Сахалин 2);
- 2003-2005** – НТС проектирования и строительства сухого дока в порту Восточный НТСС МНГП «Лунская» и «Пильтун-Астохская» установлены на шельфе (Сахалин 2);
- 2009-2012** – НТС проектирования и строительства реконструкции сухого дока в Восточном;
- 2009-2012** – НТС проектирования и строительства ОГТ платформы «Беркут» (Сахалин 1);
- 2019** – Концептуальный проект морской базы снабжения МНГП проекта Сахалин 1;
- 2018 – по наст. время** – НТС проектирования и строительства портовых ГТС ССК «Звезда» в г. Большой Камень Приморского края.

Благодарю за внимание

