

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ЦУПРИК ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ

**МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА МОРСКИЕ
СООРУЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

05.23.07 – Гидротехническое строительство

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор техн. наук, профессор
Беккер Александр Тевьевич

Владивосток

2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1 Состояние проблемы обеспечения проектной надёжности морских ледостойких гидротехнических сооружений при воздействии циклических ледовых нагрузок	14
1.1 Специфические условия проектирования и возведения морских ледостойких оснований буровых платформ в Арктике	14
1.2 Конструкции морских ледостойких оснований буровых платформ для работы в суровых ледовых условиях	20
1.3 Существующая нормативная база по расчетам ледовых нагрузок на сооружения и ее развитие в международном стандарте	37
1.4 Об области применения методологии расчета ледовой нагрузки по статическим методам методу без учета динамики разрушения льда	45
1.5 Нормирование определения ледовых нагрузок за рубежом.....	52
1.7 Сравнение действующих российских и зарубежных Норм расчета ледовых нагрузок на отдельно стоящие морские сооружения.....	60
1.8 Циклическое действие льда — причина колебаний и разрушений морских сооружений	66
1.9 Общая постановка задачи обеспечения проектной надёжности МЛО	74
Выводы	82
Глава 2 Анализ результатов экспериментально–теоретических исследований механики разрушения морского льда на контакте с вертикальными сооружениями	90
2.1 Строение и свойства морского льда	
2.2 Анализ результатов экспериментальных исследований механизмов и закономерностей разрушения льда при контактном взаимодействии с моделями призматических опор сооружений.....	102
2.3 Анализ результатов исследований параметров цикличности ледовой нагрузки на реальных сооружениях	133
Выводы	146
ЦЕЛИ, ОБЪЕКТ ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	148
Глава 3 Системно – методологический анализ макромеханических закономерностей циклического разрушения морского льда при взаимодействии с опорами гидротехнических сооружений	151
3.1 Системно– методологический анализ процесса взаимодействия ЛП с МЛО и определение места и роли критерия разрушения льда в формировании циклического характера ледовой нагрузки	151
3.2 Концептуальные подходы к выбору модели взаимодействия ЛП с МЛО с учетом механизма циклического разрушения льда	163

3.3 Синтез концептуальной базовой модели для описания циклического разрушения льда на контакте с преградами	179
Выводы по главе	199
Глава 4 Экспериментально – теоретическое моделирование процесса циклического разрушения морского льда при динамическом внедрении в него жесткого индентора	201
4.1 Общая постановка и решение задачи исследования ϵ^* как энергетического критерия прочности льда	202
4.2 Проведение полнофакторного физического эксперимента для валидации дескриптивных моделей контактного разрушения льда и определения значений удельной энергии его разрушения	209
4.3 Исследования результатов экспериментов для оценки параметров способа DBT как адекватного метода определения достоверных значений эффективной удельной энергии механического разрушения льда ϵ^*	216
4.4 Экспериментальная валидации адекватности экспериментального метода информационной модели внедрения индентора с круговой поверхностью в поверхность льда	222
4.5 Верификация метода определения величины ϵ^* сравнением расчетов ледовой нагрузки с ее применением на индентор и на опору сооружения ...	238
Выводы по главе	247
Глава 5 Динамическая имитационная модель циклической ледовой нагрузки на шельфовые сооружения на базе энергетического критерия объемного разрушения льда	249
5.1 Место расчетной модели циклической ледовой нагрузки на морское ледостойкое сооружение в методе его динамического расчета	251
5.2 К выбору концептуального подхода к методу моделирования процесса возникновения явления колебаний сооружения при разрушении льда	253
5.3 Синтез новой имитационной энергетической модели циклической ледовой нагрузки на МЛС на базе результатов экспериментов автора	276
Выводы по главе	291
Глава 6 Определение расчетных параметров для расчета циклической ледовой нагрузки на вертикальные сооружения шельфа с использованием энергетического критерия разрушения льда.....	294
6.1. Согласование разработки метода расчета параметров циклическости ледовой нагрузки с требованиями нормативных документов по исходным данным для динамического расчета МЛС	295
6.2 Исследования типов и процессов локального разрушения ледового поля на контакте с опорой гидротехнического сооружения	299
6.3 Метод получения расчетных значений энергетического критерия разрушения льда динамическими испытаниями образцов из натурального ледового покрова	313

6.4 Метод определения расчетных параметров цикличности динамической ледовой нагрузки	329
6.5 Верификация расчетной энергетической динамической модели и расчетного метода определения параметров циклической ледовой нагрузки на морское ледостойкое основание с использованием энергетического критерия разрушения льда	335
Выводы по главе	344
ЗАКЛЮЧЕНИЕ по диссертации	345
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	348
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Лист обозначений	369
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Основные понятия и определения.....	371
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Рекомендации и пример расчета по применению «Методологии определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на морские сооружения на основе энергетического подхода»....	377
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Сопроводительные документы.....	380

ВВЕДЕНИЕ

Восстановление экономик мира после пандемии требует увеличивает потребности в углеводородах. Переход на альтернативные источники займет несколько десятилетий. Истощение нефтегазовых месторождений на суше и современная экономическая обстановка делает актуальным освоение углеводородных ресурсов на шельфе Арктики и субАрктики. На этом основана Экономическая стратегия РФ до 2030 г.

Площадь арктического шельфа РФ почти 22% общей площади континентального шельфа и соизмерим с площадью нефтегазовых месторождений на суше РФ (6 млн. км²) [373, 376]. Суммарные извлекаемые ресурсы углеводородов составляют здесь 100 млрд. т условного топлива. Около 63% приходится на континентальный шельф Баренцева и Карского морей (рис. 1).

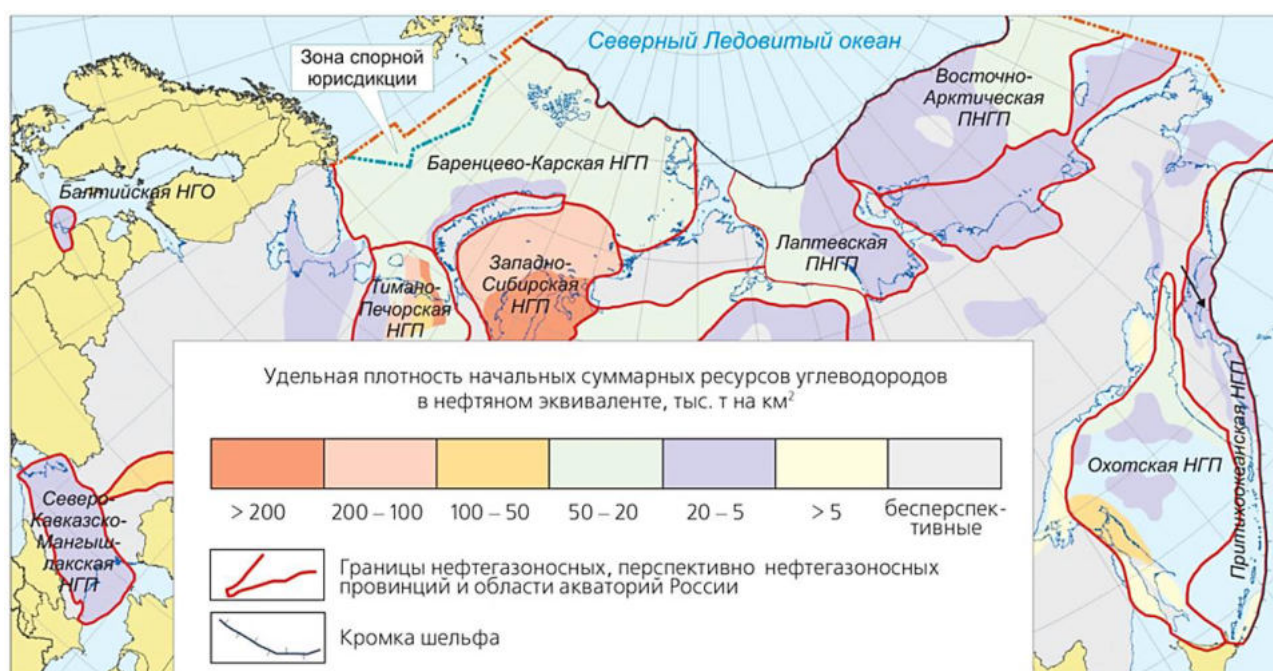


Рисунок 1 - Нефтегазоносные и перспективно нефтегазоносные провинции (НГП и ПНГП) и области акваторий России [376]

Поиск, разведка и освоение нефтегазовых месторождений на шельфе арктических и дальневосточных морей не могут быть реализованы в полной мере без широких исследований по разработке и изготовлению технических средств для освоения шельфа. Основная часть российского шельфа находится в замерзающих морях с тяжелым ледовым

режимом. Ледовые нагрузки на сооружения шельфа являются определяющими концепцию строительства технических средств – стационарных и мобильных платформ, плавсредств и др.

Актуальность темы исследования

Надежное определение ледовых нагрузок затрудняется из-за следующих факторов. Лед имеет кристаллическую структуру и текстуру с капиллярами и порами, а прочностные свойства зависят от его температуры и условий деформирования в широком диапазоне от ползучести до хрупкости. Ледовые поля (ЛП) имеют большой запас кинетической энергии, часть которого расходуется на непрерывное или периодическое локальное разрушение льда в месте контакта с опорами морских ледостойких платформ (МЛП).

Процесс взаимодействия МЛП-ЛП сопровождается разрушением локальных объемов льда и вибрацией МЛО [48, 50, 172, 173]. Известны случаи разрушения маяков в Балтийском море [18, 21, 331], двух МЛО сквозного типа в Бохайском заливе [104, 170, 306, 314], сдвигка МЛО в Азовском море [322] и др. Вибрация МЛП вызвана относительно длительным циклическим разрушением льда на контакте (рис. 2).

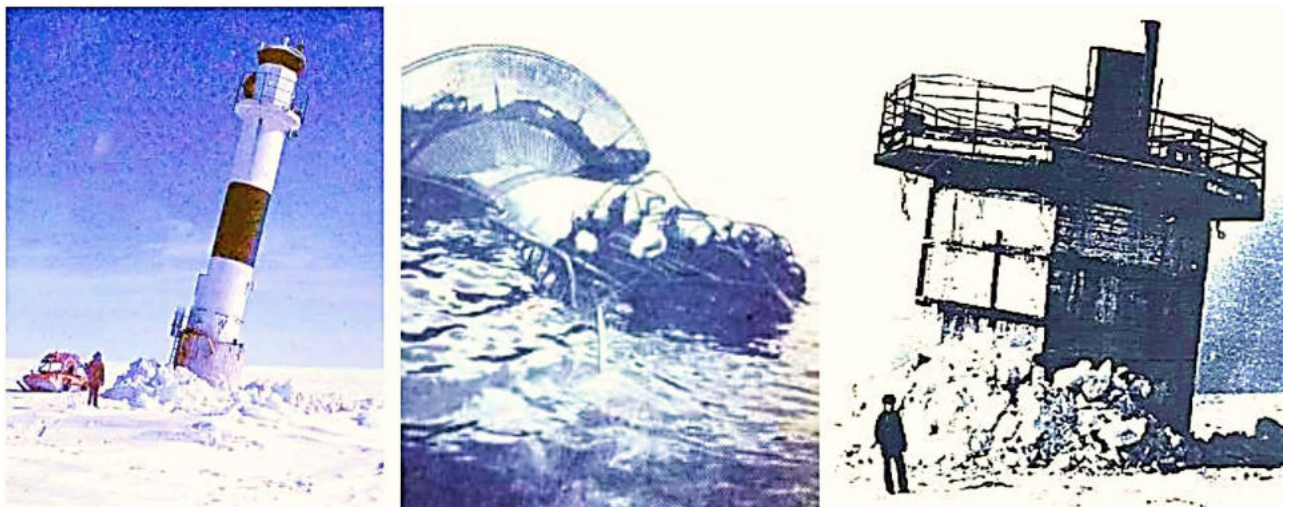


Рисунок 2 - Разрушения МЛП от действия вибрации [1,21,322]

Исследования циклического разрушения льда усилились после выявленной вибрации МЛП гравитационного типа Molikrao с размерами 111х111 м в море Бофорта. До этого считалось, что вибрация массивных МЛП невозможна [66, 116,127,131,264,336,350,417].

Продолжаются работы по совершенствованию методологии вероятностного расчета

динамической ледовой нагрузки при оценке контактной прочности льда, усталостной прочность узлов и элементов конструкций, общей устойчивости МЛП и др. [278,334,336,418,449,469,487].

Определение параметров циклической ледовой нагрузки является актуальной задачей при выборе концептуального проекта МЛП исходя из требований технологичности и экономичности проекта в целом, и прежде всего, требований надежности и безопасности.

Степень разработанности темы исследования.

Нормативные модели ледовой нагрузки базируются на статистической гипотезе о неравномерном вероятностном распределении контактного давления льда. Эта модель имеет эмпирическое происхождение и не описывает физические процессы разрушения льда. Она использует прочность льда, получаемую из стандартных испытаний малых образцов льда на одноосное сжатие.

Используются упрощенные континуальные модели льда, которые не могут отразить все многообразие ледяных образований вследствие кристаллической структуры льда и его текстуры. Но силовой подход не описывает процесс накопления упругих деформаций в массиве льда во времени и сброс нагрузки в момент разрушения этого объема льда. При этом используется большое число материальных констант процесса, требующих экспериментального определения.

Эффективным является использование методов термодинамической теории прочности и механики разрушения, описывающих разрушение массива льда как структурно-неоднородной среды с дефектами. Но такой подход пока мало используется вследствие сложности задачи. Необходим единый подход к исследованиям вибрации МЛП с учетом толщины и скорости ЛП, массы, жесткости и частоты собственных колебаний МЛП [276].

Цель и основные задачи исследования

Цель исследования – создание методологии, основанной на законах сохранения энергии и обеспечивающей получение адекватных реальному процессу разрушения льда характеристик циклической ледовой нагрузки на ледостойкое сооружение.

Поставлены следующие задачи:

- выполнить анализ методологических основ нормативных документов, регламентирующих назначение расчетных моделей ледовых нагрузок на морские гидротехнические сооружения, используемых в них критериев разрушения льда, методов их определения и применения в расчетах ледовых нагрузок на МГТС, а также анализ результатов экспериментально-теоретических исследований в области выбора расчетных моделей ледовых нагрузок и критериев разрушения льда;

- выполнить системный анализ совокупности взаимодействующих объектов ЛП и МЛП с целью определения места механизма разрушения льда в контактной зоне на поверхности сооружения, как объекта исследования в функционирующей системе «МЛП–МЛП», и роли механизма разрушения льда в формировании циклической ледовой нагрузки;

- разработать имитационную модель механизма разрушения льда на контакте с учетом его строения, физико-механических параметров и влияния на процесс его контактного разрушения факторов внешней среды и параметров задачи;

- выполнить теоретические и экспериментальные исследования критерия разрушения морского льда с использованием энергетической концепции разрушения и разработать метод экспериментального определения физических значений критерия с использованием математического и физического моделирования;

- разработать методики определения расчетных значений циклической ледовой нагрузки на МЛП: максимального значения силы ледового давления и длительности цикла ледовой нагрузки – периода разрушения льда с использованием критерия динамического разрушения льда с выполнением верификации;

- разработать рекомендации по применению нового критерия динамического механического разрушения льда для определения расчетных значений параметров цикличности процесса.

Объектом исследований является взаимодействие с процессами обмена энергией в системе «МЛП–ЛП» в зоне контакта.

Научная новизна работы

Научная новизна состоит в следующих результатах работы:

- впервые, из анализа энергетического обмена в системе «ЛП – МГТС» в качестве интегрального критерия разрушения льда предложена к применению в расчетах

параметров циклической ледовой нагрузки эффективная плотность удельной упругой энергии ϵ_{cr} , связанная с особенностями реологических свойств морского льда; инициирующая начало цикла разрушения льда и регулирующая длительность этого цикла, определяющую период ледовой нагрузки на сооружение;

- впервые, по результатам экспериментальных исследований удельной энергии механического разрушения льда ϵ_{cr} , предложена универсальная математическая феноменологическая энергетическая модель описания сложного комплексного явления послойного разрушения льда, включающего ряд одновременно протекающих стохастически развивающихся в слое обладающего сложной реологией льда, процессов различных типов деформирования в одном акте разрушения напряженного слоя льда единым интегральным энергетическим критерием разрушения морского льда, – плотностью эффективной удельной энергии механического разрушения льда– ϵ_{cr} .

– впервые для определения удельной энергии механического разрушения льда ϵ_{cr} предложен способ динамических испытаний больших образцов различной формы, показана инвариантность этой характеристики к условиям испытаний, высокая повторяемость результатов, получена зависимость этой величины от температуры;

– впервые разработана методика экспериментального определения расчетных параметров цикличности разрушения морского льда (максимального значения контактной силы и ее частоты) для динамического расчета МГТС с использованием эффективной плотности удельной упругой энергии ϵ_{cr} – критерия его разрушения.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическую значимость исследования имеет математическая модель описания одновременно протекающих разных по природе типов стохастически развивающихся процессов разрушения льда, обладающего сложной реологией, в одном комплексном акте разрушения напряженного объема льда единым интегральным энергетическим критерием разрушения морского льда – плотностью эффективной удельной энергии механического разрушения льда.

Практическая значимость исследования состоит в уточнении механизма разрушения льда для использования в проектной практике, а именно, в выполнении расчетов параметров цикличности ледовой нагрузки, обеспечивающей повышение надежности результатов расчетов ледовой нагрузки на МГТС, дополняющей

нормативную статическую методологию, в том числе:

1. В возможности разработки имитационных численных моделей с применением в качестве критерия разрушения льда плотности эффективной удельной энергии его механического разрушения для использования в программно-расчетных комплексах для обоснования форм и размеров МЛП, расчетов их надежности;

2. В применении для расчетов параметров цикличности динамической ледовой нагрузки на МЛП методик экспериментального определения эффективных значений удельной энергии механического разрушения льда, как энергетического критерия динамической прочности с использованием больших образцов льда;

3. В разработке и верификации моделей контактных взаимодействий ЛП с МГТС для реальных проектов их возведения в условиях конкретного региона с учетом реальных значений энергетического параметра его прочности, получаемого в результате опытов с образцами или полупространством льда.

Автор участвовал в корректировке главы СНиП II-57-75 "Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)" и разработке новой редакции СНиП 2.06.04-82 в 1973-76 гг. Результаты исследований отражены в отчетах о НИР № 78009129 «Разработка методов расчета характеристик льдов для проектирования и строительства гидротехнических сооружений в шельфовых зонах морей СССР». Отдельные методики работы применялись в обеспечении проектно-изыскательских работ по заказам проектных организаций (см. приложение).

Методы исследований

В качестве методологической основы и инструментов научного исследования в работе использованы системный анализ и энергетический подход к анализу всех физических явлений, характерных для данной проблемы. Теоретическую основу исследования составляют механические теории прочности из теории упругости; энергетическая, кинетическая, термодинамическая и статистическая теории разрушения. Для экспериментальных исследований и численного моделирования использованы методы теории планирования экспериментов, методы теории вероятности и математической статистики, спектральный анализ плотности мощности контактного разрушения льда.

Положения, выносимые на защиту:

Комплекс моделей, методов и способов для определения параметров циклической ледовой нагрузки, включающий:

1 Энергетический критерий динамической прочности льда – плотность эффективной удельной энергии его механического разрушения, как интегральный параметр динамической прочности льда;

2 Феноменологическая энергетическая модель описания процессов различных типов в зоне контакта МЛП-ЛП;

3 Метод определения удельной энергии механического разрушения льда кутем динамического испытания больших образцов льда на сжатие при определенном соотношении размеров образцов льда_г;

4 Методика определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на основе динамических испытаний больших образцов сжатием;

5 Метод верификации расчетных параметров цикла динамической ледовой нагрузки, получаемых в испытаниях больших образцов.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивает корректным использованием принципов системного подхода, математических и физических методов, в частности фундаментальных законов физики и модификации методов механики деформируемого твердого тела и механики разрушения; применением планирования полнофакторного эксперимента и обработки его результатов методами математической статистики; сопоставительными решениями при различных идеализациях, сравнения результатов исследований с данными других исследователей.

Личный вклад автора

Автором сформулированы цель работы, объект, предмет и задачи исследования, методология исследования на основе системного анализа и энергетического подхода к описанию динамического процесса взаимодействия ЛП с МЛП; разработаны модели разрушения льда, выявлен и описан энергетический интегральный критерий динамической прочности морского льда; выполнены верификации моделей разрушения льда численным и физическими экспериментами. Автор руководил или участвовал в разработке, планировании и проведении экспериментов; планирования, в обработке экспериментальных данных, анализе и интерпретации их результатов, в апробации результатов экспериментов в математических моделях.

Автором запатентован и реализован метод определения энергетического критерия разрушения льда динамическими испытаниями на сжатие больших образцов, выполнена оцифровка и статистическая обработка записей процессов разрушения образцов и прорезания моделями ЛП для выполнения прямой верификации методики определения расчетной частоты пиков ледовой нагрузки путем сравнения частотных спектров мощности.

Разработаны методика экспериментального определения параметров циклической ледовой нагрузки на МЛП, выполнены несколько НИОКР, выполнение внедрение результатов исследований.

Апробация работы

Основные положения исследований на различных научных форумах, в том числе на Международном симпозиуме «Физические методы исследования снега и льда» (Ленинград, 1973); на симпозиуме "Физико-технические проблемы морского льда" (Ленинград, 1976); на Всесоюзной конференциях «Проблемы научных исследований в высшей школе в области изучения и освоения Мирового океана (Владивосток, 1976, 1983); на Всесоюзных координационных совещаниях по гидротехнике (Волгоград, 1975, Нарва, 1979, Мурманск, 1983); на Международном симпозиуме МАГИ (Лули, 1978, Владивосток, 2018); на Всесоюзных конференциях по механике и физике льда (Москва, 1981, 1983); на Международной конференции по ледовым технологиям (Кэмбридж, 1986); на Международных конференциях по шельфовому и полярному инжинирингу ISOPE (Сан-Франциско, 1992, Родос, 2012, Анкоридж, 2013, Пусан, 2014, Гавайи, 2015; Родос, 2016, Сан-Франциско, 2017); на Тихоокеанско-Азиатских симпозиумах ISOPE (PACOMS) (Владивосток, 2012; Чеджу, 2018); на Международном симпозиуме по Охотскому морю и морскому льду (Момбецу, 2012, 2014, 2015); на Международном симпозиуме по морскому инжинирингу и технологиям (ISMT), Пусан, 2013); на Международном геотехническом симпозиуме (Инчхон, 2013); на Всероссийских конференциях с международным участием «Полярная механика» (Новосибирск 2012, 2018 С-Петербург, 2014, 2017, Владивосток 2016); на Международных конференциях по океану и Арктике (РОАС) (Трондхейм, 2015, Пусан, 2017); на Всероссийской НТК «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии» (С-Петербург, 2015); на Международной НТК «Фундаментальные исследования океанотехники и морской

инфраструктуры (Комсомольск-на-Амуре, 2015); на Международной конференции «Российский арктический шельф» (RAO/CIS OFFSHORE) (С-Петербург, 2017); на Международной научной и технической конференции "Earth Science" (Владивосток, 2020); на Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность инженерных сооружений в регионах со сложными природными условиями» (Владивосток, 2021) и др.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано более 70 научных работ, в том числе 15 – в журналах из списка ВАК; 16 – в изданиях, реферируемых Scopus и WoS; в изданиях, индексируемых в базе «ядро РИНЦ» – 3; подготовлено более 10 отчетов НИОКР; получено 4 патента.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, 6-ти глав, Заключение, Списка использованных источников из 387 наименований на 20 страницах, 4 приложений. Она содержит 394 с. текста, 155 рис., 21 табл. Приложения содержат термины, обозначения, основные результаты экспериментальных исследований и копии документов, подтверждающих внедрение результатов исследований.

Материалы данного исследования в течение многих лет используются в учебном процессе при подготовке бакалавров, специалистов, магистров и аспирантов по профилям «Гидротехнические сооружения», «Прикладная механика и математическое моделирование» направлений подготовки «Строительство» и «Прикладная механика», специальности «Строительство уникальных зданий и сооружений».

ГЛАВА 1 Состояние проблемы обеспечения проектной надёжности морских ледостойких сооружений при воздействии циклических ледовых нагрузок

1.1 Специфические условия возведения морских ледостойких оснований буровых платформ в Арктике

Мировая практика морской добычи нефти и газа имеет значительный опыт по освоению морских шельфов. Но этот опыт накоплен почти исключительно для условий с умеренным климатом. В России также имеется опыт нефтедобычи на южном Каспии, однако большинство морских запасов углеводородов России находятся на шельфах морей Северного ледовитого океана и северных морей Тихого океана. Эти акватории отличаются суровыми гидрометеорологическими условиями и практически круглый год покрыты дрейфующими льдами, имеющими разный по сезонам уровень сплоченности. Но на данном этапе освоения шельфов ледовитых морей в целях добычи углеводородов эта отрасль не имеет устоявшихся отработанных технологий и находится в стадии разработки и апробации высоконадежных технических средств для организации в необходимых масштабах буровых и эксплуатационных работ в условиях ледовых воздействий на такие средства.

Реализованных и находящихся в стадии завершения проектов строительства **стационарных нефтегазодобывающих сооружений вертикального типа** в Арктике или в схожих условиях немного – (платформа «Приразломная», Hibernia, Terra Nova, платформы проектов Сахалин-1 и 2, проекты в море Бофорта). Всего в настоящее время в мире существует около 100 различных проектов ледостойких оснований для буровых платформ, а также искусственных островов. Но в числе реализованных в Арктике или в схожих условиях на протяжении последних 50 лет не более 35 проектов ледостойких сооружений всех типов, в том числе 2-х металлических платформ разных типов в заливе Кука (США), 22 искусственных островов (грунтовых, ледовых стационарных и плавучих, в канадском и американском секторах моря Бофорта в Северном ледовитом океане [9,393], 8 платформ кессонного типа разной конструкции там же [393], нескольких платформ ферменного типа в Бохайском заливе, еще 5 платформ кессонного типа в Охотском море (Сахалин 1 и 2) и буровой платформы «Приразломная» в Печорском море также кессонного типа (рис. 1.6). Все эти проекты реализованы в разных точках планеты раз-

личными операторами и по различным проектам. Часть из них давно закрыто, но некоторые из платформ получили вторую жизнь после реконструкций и доработок. Все это говорит о том, что в мире в настоящее время идет накопление знаний о работах в ледовитых морях в природно-климатических зонах с суровыми условиями, влияющими на создаваемые конструкции новых сооружений и новые технологии кардинальным образом [9,277,286,288,336,393].

Актуальность создания таких морских оснований буровых платформ, которые были бы надежными в работе при различных изменениях условий окружающей среды, в особенности в ледовой обстановке, обусловлена необходимостью круглогодичного выполнения работ по бурению скважин для добычи нефти и газа. Главные трудности в проектировании и строительстве МЛО в морях Арктической зоны возникают от необходимости учета воздействия на них дрейфующих ледовых полей. Методы расчетов ледовой нагрузки, несмотря на более чем вековой срок исследований свойств морского льда и существование уже построенных и эксплуатируемых сооружений до настоящего времени не имеют теоретической базы, основанной на физических законах.

1.1.1 Особенности ледовых режимов участков российского континентального шельфа, перспективного для добычи углеводородов

Наиболее перспективными районами российских шельфов в замерзающих морях с разведанными запасами нефти и газа являются шельфы Баренцева, Печорского, Карского и др. морей в Северном Ледовитом Океане (Рис. 1.1.1), а также шельфы Охотского и Берингова морей Тихого океана (Рис. 1.1.2). В регионах российской Арктики обнаружены крупнейшие газовые и газоконденсатные месторождения, где активно, на разных стадиях идет разработка проектов (Мурманское, Штокмановское, Северо-Кильдинское, Приразломное и другие). Уже сейчас находятся в стадии эксплуатации месторождение Приразломное и ряд месторождений Охотоморского шельфа (Пильтун-Астохское, Лунское, Чайво, Одопту, Аркутун-Дагинское и др.). В октябре 2017 г. и ноябре 2018 г. на Айяшском блоке (Рис. 1.1.2) пробуренные ООО «Газпромнефть-Сахалин» 2 скважины показали наличие 2-х крупных месторождений нефти, названных «Нептун» и «Тритон» соответственно [397].

Как правило, разработка всякого проекта добычи углеводородов на морских месторождениях начинается с анализа гидрометеорологической информации рассматриваемого региона, включая ледовый режим. Именно эти данные определяют условия работы

будущих сооружений обустройства морских месторождений, в частности – Морских Недостойких Сооружений (МЛС). Такие данные используются и на этапе принятия решений и – в основном – на этапе проектирования оснований буровых платформ.

Наиболее часто имеет место взаимодействие МЛО с ровными или торосистыми полями льда. Размеры ледовых образований (согласно принятой международной классификации ледовых образований [402]) в виде битого льда, обломков ледовых полей или больших и даже гигантских ледовых полей могут варьироваться от долей до сотен квадратных километров. Опасность для МЛО на шельфе могут представлять дрейфующие ледовые поля размерами до тысячи (гигантские поля) и в несколько сотен (обширные поля) квадратных километров. Между ними всегда есть обломки полей до нескольких десятков квадратных км и крупнобитый лед в несколько квадратных километров, пример приведен на Рис. 1.1.3

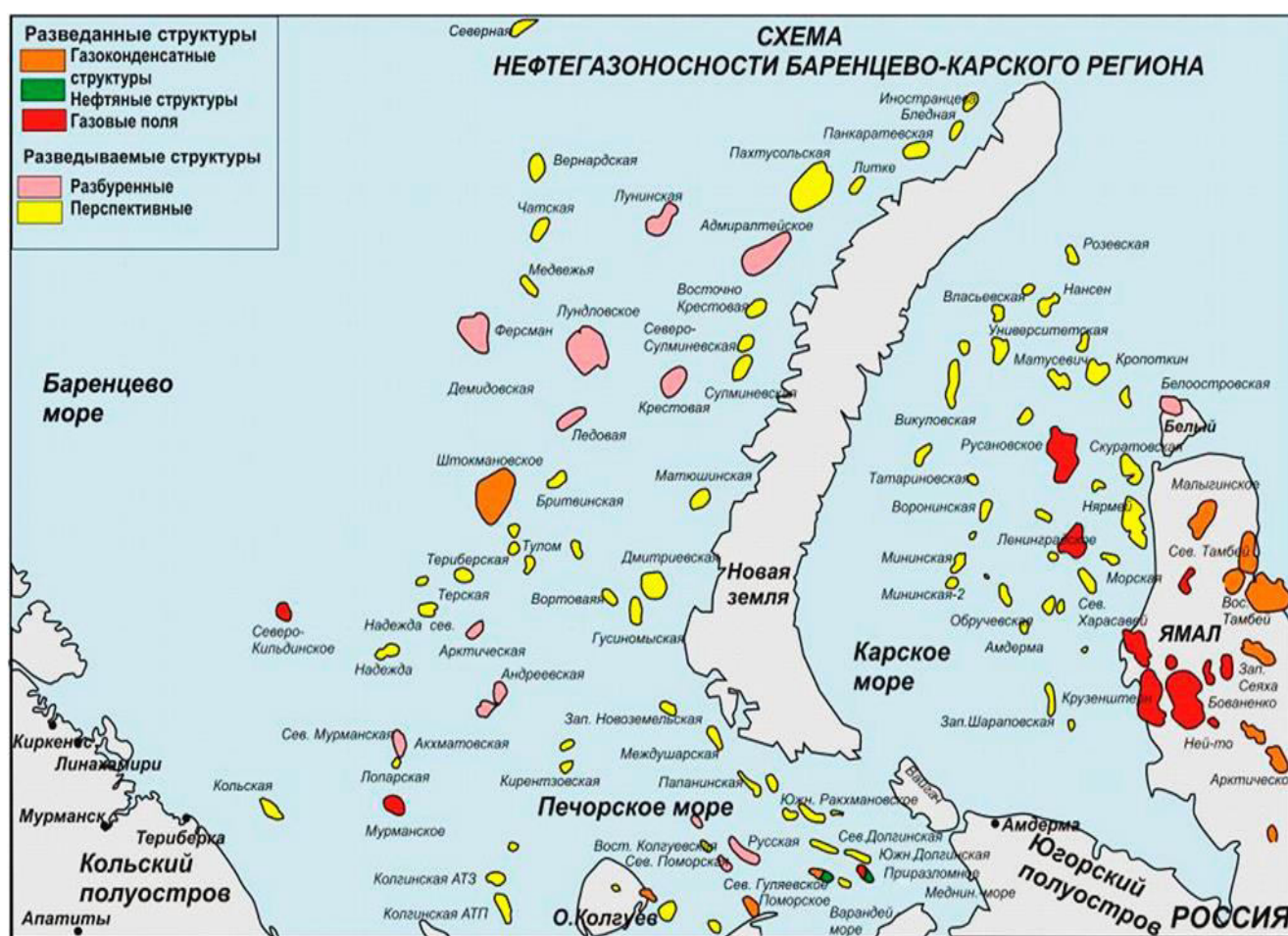


Рис. 1.1.1 Схема расположения нефтегазовых месторождений в Баренцево-Карском регионе российской Арктики по [279]

Как здесь показано, перспективными участками шельфов ледовитых морей в России являются шельфы Баренцева, Карского, Печорского, Каспийского, Берингова и Охотского морей [305,322,323,326,402]. Не останавливаясь на подробном анализе обширнейшего материала по ледовым режимам всех российских морей, где имеются разведанные и подтвержденные запасы углеводородов [52,278,361,370,371,390,425,426,454], заметим, что свод данных о ледовых образованиях, параметры которых применяются в расчетах ледовой нагрузки на МЛО постоянно обновляется и пополняется. Ниже, в таблице 1.1.2 приведены сводные данные по основным параметрам ледовых образований, которые должны учитываться в расчетах ледовой нагрузки на МЛО, собранные в отчетах, которые были выполнены по результатам НИР ААНИИ в 2002 г. [378], а также нами в результате ОКР 2014 года [398].

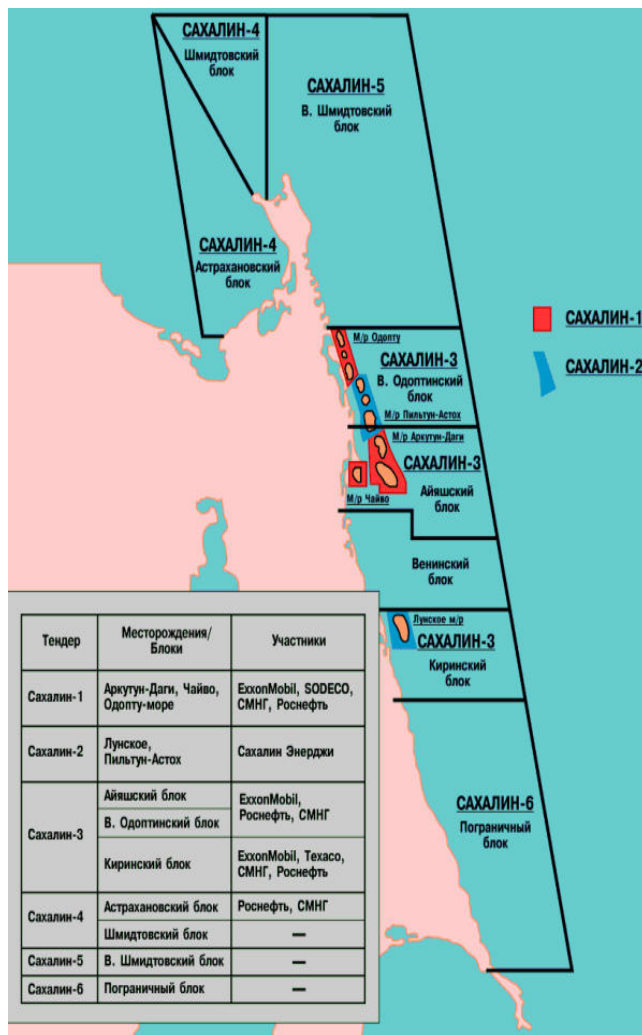


Рис. 1.1.2 Расположение перспективных участков на месторождениях северо-восточного шельфа о. Сахалин по [292]

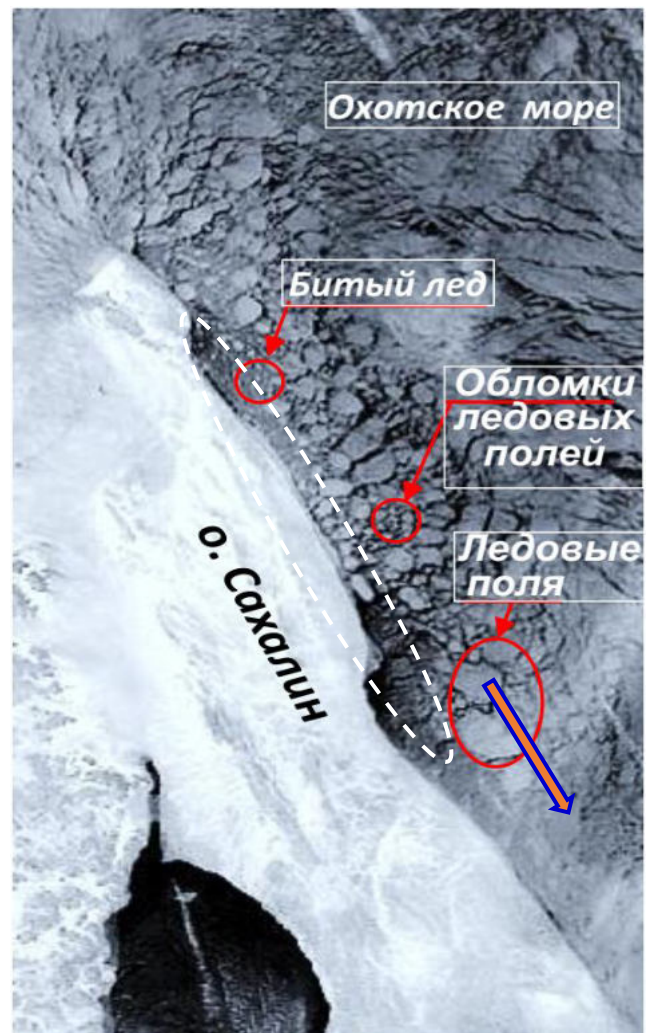


Рис. 1.1.3 Схема дрейфа ледовых образований различных размеров вдоль побережья о. Сахалин по [371]

Таблица 1.1.1 Свод параметров ледовых образований, применяемых в расчетах ледовой нагрузки на МЛО [278,291,370,371,378,425,426,454]

Регион, море, источник	Длительность ледового периода (дн)	Размеры ледовых полей (км ²)	Толщина льда в зимний период (см)	Скорость дрейфа льда (м/с)	Примечания
Баренцево море	30-150	0,05 – 0,15	Однолетний -180; Многолетн. – 500	0,7 – 0,8	Угроза айсбергов: V_a - до 1,12 м/с
Карское море	250 - 270	1 - 10	Обычно: 140-170; Холодные зимы: до 250	До 1,1 – 1,3	Наслоенный лед 250-300, иногда 350 см
Печорское море	Запад – 185, восток - 270. Редко 300	0,2-4,0 Редко 78	Припай 80-110 Макс. – до 160	0,02 - 0,05	Часто – наслоенный лед до 300 см
Охотское море	Север моря: 230-240; у Сахалина: 170 - 190	До 500	Однолетние: тонкий (30 -70); средний (70-120); толстый (170).	Средняя 0,5 – 0,6; Макс. 1,7; Чайво –2,1	Реверсивный характер дрейфа в районе месторождений
Каспийское море (север)	100-150	1-3	Сев.-запад - до 60; Сев.-восток – до 90; Припай 90 – 120.	0,12 – 0,8	Наслоения при слабозмерзшихся слоях до 1,5-2,0 м
Море Бофорта	До 300	7 - 15	Однолетний -200; Многолетн.– 500	0,06 – 0,18	Обломки ледовых островов h=30м. Редко

Сравнительный анализ параметров ледового режима для Охотского моря, моря Бофорта, Карского и Берингова морей и других арктических районов показал, что по сложности ледовых условий Охотское море можно отнести к арктическим морям. Здесь длительный ледовый период, большая толщина льда в суровые зимы, большие размеры полей и высокая скорость их дрейфа, особенностью которого является реверсивный характер в районе месторождений. Трусков П.А. и др. [425,426] показали, что направление генерального дрейфа льда вдоль побережья северного Сахалина имеет достаточно выраженное направление вдоль берега на юго-восток (Рис. 1.1.3)

Особенностью информации о ледовой обстановке, изучаемой с целью строительства МЛО в конкретном регионе шельфа побережий ледовитых морей, в отличие от общей информации о погодных проявлениях для других видов деятельности, заключается в *неочевидности прогностического характера представляемой информации*. Сначала

за рубежом, а теперь и в России в подобной проектной практике используются вероятностно-статистические данные, в основном, **функции плотности распределения вероятности** (*pdf*) как физико-механических характеристик морского льда, так и кинематических параметров ледового покрова. Как правило, такими параметрами ледовой обстановки в районе проектирования МЛО являются: даты ледовых периодов, направления дрейфа ледовых полей, их размеры и скорость, толщина льда, прочность льда на сжатие, его соленость, плотность и температура в расчетные периоды.

Прогностический характер таких данных обусловлен тем, что они получены в прошлом, используются же с расчетом на будущее. Правомерность такого подхода не может быть без предположения, что выборка, обработка которой привела к получению нормативных значений параметров ледяного покрова, репрезентативна не только по отношению к прошлому, но и по отношению к будущему (равному периоду эксплуатации конкретного месторождения) [278].

Мощность воздействия льда на МЛО определяется запасом кинетической энергии ЛП, прочностью льда и геометрическими соотношениями ЛП и опоры сооружения. Проектные размеры сооружения (буровой платформы и основания под нее), масса и жесткость его конструкции, а также податливость грунта морского дна наряду с характеристиками прочности льда, толщины ледового покрова и скоростью его дрейфа являются основными параметрами для расчетов проектной надежности морского ледостойкого основания. Но действующие нормативные документы регламентируют только порядок статических расчетов максимальной расчетной силы (ледового давления). В действительности воздействие на МЛО ледяных полей, имеющих различные энергетические характеристики, создаёт широкие вариации нагрузок на сооружение.

С учетом третьего закона Ньютона сила давления ледовой плиты на опорную конструкцию сооружения (опору) равна силе давления опоры сооружения на грань ледовой плиты. Исходя из необходимости создания «ледостойкой» конструкции основания сооружения, его глобальная и местная жесткости (общая устойчивость сооружения и локальная прочность опоры) должны быть выше жесткости льда в массиве ледового поля, то есть **лед должен разрушаться в зоне его контакта с опорой сооружения**. Вековой опыт строительства мостов показал, что это условие в условиях ледоходов на реках для «теплого» и рыхлого льда различными инженерными и экономическими решениями достигается. Но для относительно прочных морских льдов в процессе их разрушения на опорах маяков, опор эстакад и первых нефтедобывающих платформ в заливе Кука и Бохайском заливе выявилось **явление периодического разрушения льда** при его прорезании опорой [20,43,59,156,190,267].

Периодическое разрушение льда на его контакте с опорами сооружений генерирует *циклические силовые воздействия на сооружение*, характеризующиеся как **максимальными значениями отдельных пиков** силы, так и **частотой их чередования** в течение времени прорезания опорой сооружения ледового поля, что вызывает не только вибрацию элементов конструкции, но и несет угрозу развития резонансных явлений в системе «лед-сооружение». Поэтому такие сооружения и их компоненты должны удовлетворять требованиям как статической, так и динамической устойчивости при циклическом разрушении льда.

Необходимо отметить, что в настоящее время освоение замерзающих шельфов морей России представляет собой **сложную научную и инженерную проблему**, решение которой требует создания во многом уникальной для мировой практики **методологии получения расчетных параметров цикличности ледовой нагрузки** для проектных расчетов МЛО. В настоящее время пока имеется ограниченный опыт национальной проектной практики в данной области.

1.2 Конструкции морских ледостойких оснований буровых платформ возведенные для работы в суровых ледовых условиях

Усилившийся в последние десятилетия интерес к освоению морских нефтегазовых месторождений в северных морях с дрейфующими льдами стимулировал появление множества технических средств различных типов для решения этой проблемы. В настоящее время широко применяются два основных метода эксплуатации месторождений: надводный и подводный. Конструкции гидротехнических сооружений для освоения шельфа находятся в непрерывном развитии. Это связано с освоением новых районов, выходом на более глубоководные участки и с появлением новых технических решений. В каждом регионе может быть применен один из известных типов сооружений или разработано оригинальное ледостойкое основание для размещения буровой платформы, что, прежде всего, определяется изученностью ледовых условий в районе месторождения, проектируемого к освоению.

Тип морского ледостойкого сооружения (МЛС) определяется его функциональным назначением, особенностью ледового режима региона, глубиной моря, грунтовыми условиями на точке установки и другими конкретными технологическими условиями проекта. Существенную роль играют также разнообразные конъектурные соображения,

качество и объем технологического оборудования, наличие производственных мощностей и уровень развития инфраструктуры, отдаленность от промышленных районов, наличие местных строительных материалов и баз снабжения и ряд других данных [33,236,278,286,334,414]. Также, не менее существенную роль при этом играет опыт проектирования, возведения и эксплуатации выбираемого типа сооружения. **Основными критериями являются проектная надежность сооружения (долговечность) и стоимость проекта** [33,277,286,361,372].

Мировая практика возведения ледостойких нефтегазопромысловых сооружений для освоения месторождений шельфовой зоны замерзающих морей показывает, что эта деятельность начиналась с небольших глубин (до 15 м) и невысокой активности дрейфа льда (припайная зона). Это вызвано разными причинами, такими как: недостаточная изученность ледовых воздействий, сложность изготовления, транспортировки и монтажа ледостойких сооружений, удаленность районов строительства от развитых промышленных районов и многими другими. Примером применения различных типов сооружений, принципы обеспечения устойчивости при горизонтальной ледовой нагрузке которых кардинально отличались, является история освоения месторождений в Канадском и Американском секторах моря Бофорта в 1970–90-х годах. Здесь за этот период было пробурено в общей сложности более 140 скважин с различных оснований. В течение этого периода для обеспечения буровых работ в этом регионе с суровым климатом и тяжелыми ледовыми условиями проводились непрерывные исследования этих условий, и, в зависимости от разных сочетаний ледовых условий и глубины воды, было внедрено множество новаторских решений и технологий. Здесь в широком диапазоне были использованы различные типы сооружений, обеспечивших бурение от уреза воды до глубины 500 м [9,33,42,96,240,236], это: искусственные стационарные и плавучие ледовые острова, плавающие буровые суда, гравитационные кессонные конструкции и др.

Этот мировой опыт стал основой для сформировавшейся к 90-м годам классификации морских шельфовых сооружений предназначенных для разведки и разработки подводных месторождений нефти и газа [278,414], обозначившей **три основных типа надводных морских оснований буровых платформ**¹, которые классифицируются по признаку обеспечения закрепления на точке бурения, они условно подразделяются на: **стационарные** — искусственные острова, основания кессонного типа, эстакады;

¹ См. Приложение «Тезаурус» на «Основание буровой платформы»

полустационарные — самоподнимающиеся плавучие буровые установки и плавающие искусственные ледовые острова; **подвижные** — буровые суда, баржи и другие плавучие устройства (полупогружные установки).

В данном исследовании рассматривается взаимодействие дрейфующих ледовых полей *только со стационарными сооружениями*, поскольку они наиболее эффективны для размещения буровых платформ в районах российской Арктики и Охотского моря, где разведка месторождений проведена и такие платформы устанавливаются с расчетом их эксплуатации в непрерывном режиме в течение полного освоения месторождения, т.е. на несколько лет.

Стационарные шельфовые сооружения – это наиболее многочисленный и развивающийся класс гидротехнических сооружений, которые, как правило, эксплуатируются долговременно и «по полному циклу применения» – т.е. и для бурения скважин, и добычи, и первичной переработки и хранения нефти и газа [9,96,240,286,288,336]. Сооружения такого типа *воспринимают горизонтальную квазистатическую нагрузку* от ледовых полей в уровне воды и должны обладать высокой надежностью их *сопротивления сдвигу* относительно дна для обеспечения целостности буровой колонны, *сопротивления сооружения на опрокидывание* и *сопротивления разрушению или потере устойчивости* самого тела сооружения.

С точки зрения проектирования сооружения с учетом динамического взаимодействия льда с его конструкцией *тип сооружения предопределяет ряд важнейших параметров процесса взаимодействия дрейфующего ледового покрова с сооружением*, таких, например, как передача усилий и деформаций от места контакта всему сооружению, грунту основания, а также комплексу бурового оборудования. С учетом этого, в данном исследовании не рассматриваются такие гравитационные конструкции, как **грунтовые, ледовые и ледогрунтовые острова**, применявшиеся на начальной стадии освоения месторождений в море Бофорта, т.к. их широкие и массивные, но не жесткие структуры являются естественными гасителями вибраций от циклического разрушения несоизмеримо тонкого с их шириной льда при его изгибе торшении на их откосах.

Стремление проектировщиков снизить стоимость сооружения за счет уменьшения их ширины и уменьшения отношения их ширины (диаметра) к толщине льда (B/h), обосновывается законами механики, говорящими о том, что в этом случае должна быть характерна более высокая концентрация контактных давлений на поверхности опоры, и, за счет

этого – должно обеспечиваться «прорезание» ледового покрова сооружения. Но, учитывая те же законы физики, такие сооружения *для обеспечения их устойчивости* должны иметь высокую системную жесткость их конструкций и, следовательно, будут обладать более высокими собственными частотами по сравнению с сооружениями с *большими* значениями B/h и не высокими собственными частотами и менее чувствительными к колебаниям, вызванным разрушением льда. Поэтому **выбор типа сооружения** (при прочих равных условиях) – как основного элемента проекта освоения конкретного месторождения углеводородов на шельфе ледовитых морей **является одним из основных факторов**, влияющих на возможность возникновения резонансных явлений от циклической нагрузки при разрушении льда, то есть – на надежность проекта в целом.

Таким образом, поперечные размеры сооружения могут быть положены в основу классификации методов определения ледовых нагрузок и все методы расчета ледовых воздействий целесообразно разделить на три группы [297]:

- а) взаимодействие льда с *гибкими узкими опорами*;
- б) взаимодействия льда с *жесткими опорами*;
- в) взаимодействия льда с сооружениями островного типа и кессонами.

С учетом требований к надежности показателей сопротивления оснований буровых платформ ледовой нагрузке, по их конструктивным особенностям, обеспечивающим выполнение этих требований на практике, все стационарные конструкции МЛО, возводимые на морском дне на глубинах до 100 метров, в хронологическом порядке их появления в реальных конструкциях можно условно разделить на *эстакады, гравитационные и комбинированные сооружения*.

1.2.1 Стационарные основания буровых платформ эстакадного типа

Основа таких сооружений – это пространственно-стержневые (ферменные) конструкции, имеющие массу, недостаточную для надежного сцепления с грунтом и, как правило, закрепляются на грунте с помощью забивных свай (Рис.1.2.1). Основными элементами блоков являются стальные трубы диаметром 1,2–10 м со стенками толщиной 15–50 мм. Трубы большого диаметра, используемые, как правило, для угловых стоек, подкрепляются внутри поперечными диафрагмами с вырезами и продольным набором. Для более надежного закрепления стационарной платформы на грунте внутри основных несущих

стержней в грунт дна моря забивают удерживающие сваи на расчетную глубину, соединяемые с несущими стойками фермы после забивки. Эти сваи удерживают платформу не только от опрокидывания, но и от сдвига.

Первыми основаниями пространственно-стержневой конструкции были ледостойкие основания буровых платформ в заливе Кука на Аляске (Рис. 1.2.1). Их проектирование и строительство в 1962 г. и позднее стало заметной вехой в освоении шельфов ледовитых морей. В этом районе в 1960-е годы было возведено 14 крупных морских сооружений, способных противостоять экстремальным условиям окружающей среды.

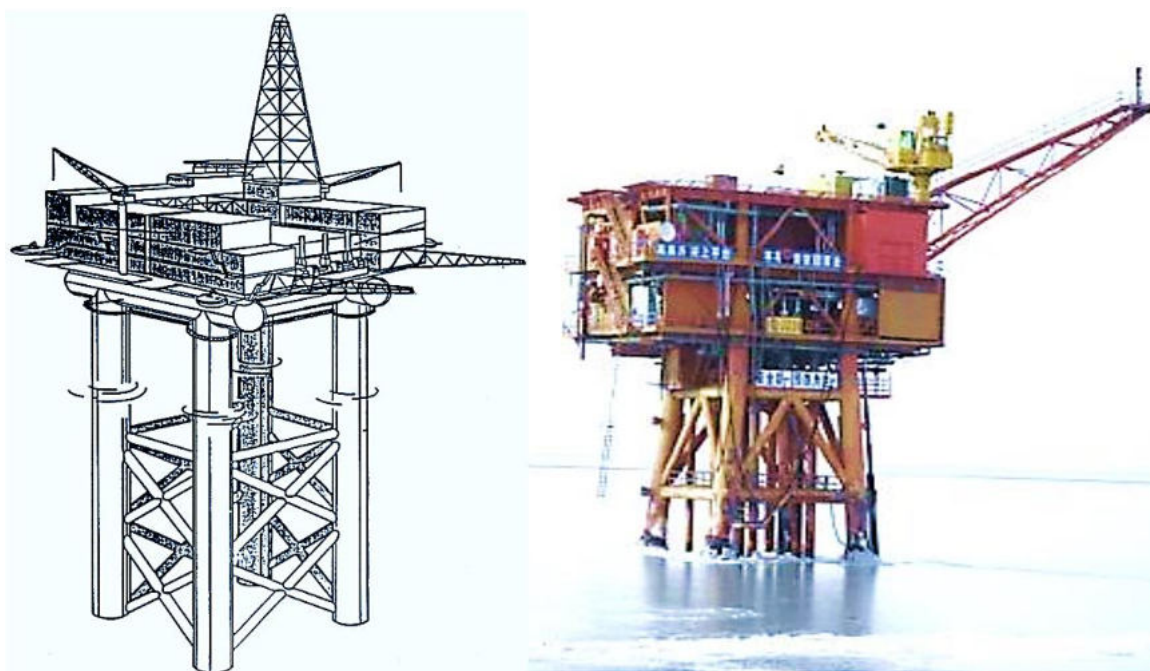


Рисунок 1.2.1. Стационарные основания буровых платформ эстакадного типа в заливе Кука на Аляске по [20,190,191] и в Бохайском заливе (Китай) по [264,267,269]

Несмотря на достаточно высокую жесткость таких стационарных оснований буровых платформ эстакадного типа, движущийся под действием течений и ветра ледовый покров, разрушаясь на опорах конструкции, вызывает ее **колебания, генерируемые разрушающимся льдом**.

Именно на таких конструкциях в заливе Кука **впервые было отмечено явление вибрации сооружения** от действия льда. В исследованиях [190,191] Н.Р. Reyton отмечает потенциально важную характеристику частоты разрушения льда, которая находится в пределах одного цикла в секунду и говорит о том, что *«Такое явление может иметь решающее значение»* для надежности сооружения. Им отмечается также, что эта частота не связана с частотой собственных колебаний сооружения, но время цикла разрушения льда связано с прочностью льда, гибкостью сооружения и со скоростью ледового поля.

По данным исследований механизмов возбуждения колебаний бурового основания при циклическом разрушении льда, проводившихся в этом же месте на аналогичных сооружениях [20], их автор К.А. Blenkarn показал, что «Такие колебания формируются в системе «Ледовое поле – Сооружение», и период колебаний формируется внутри системы в зависимости от жесткости сооружения и эффективной массы льдины.

1.2.2 Стационарные гравитационные основания буровых платформ кессонного типа

Канадский и американский опыт освоения месторождений в море Бофорта [9,33,96,240,236] говорит о том, что первоначально на мелководье (до 12 м) и невысокой активности дрейфа льда (припайная зона) помимо **грунтовых, ледовых и**

ледогрунтовых островов оправданным было строительство «кессонных островов».

Поэтому в классе морских ледостойких **сооружений гравитационного типа**, применявшихся при освоении месторождений в ледовых условиях, кессонные острова были очень широко использованы в освоении месторождений углеводородов в море Бофорта прежде всего *потому, что они предназначены для неоднократного применения одной конструкции*. Схематические поперечные разрезы островов кессонного типа приведены на рисунке 1.2.2.

Эти конструкции являются разновидностью грунтовых островов, но основой такого сооружения является кессон – металлические или стале – бетонные одиночные наплавные прямоугольные элементы или элементы секционного типа, собираемые в кольцеобразную конструкцию. Кессон обеспечен оборудованием для погружения на дно и

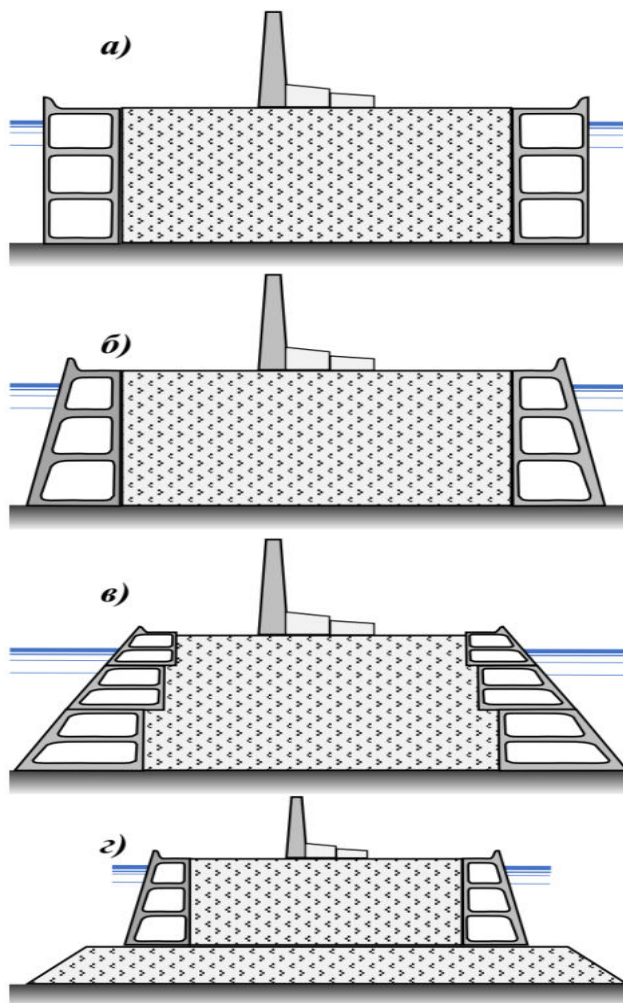


Рисунок 1.2.2 Искусственные основания буровых платформ островного типа из стальных кессонов для многократного использования

всплытия за счет заполнения и продувки балластных отсеков. Кессоны могут иметь форму цилиндра (Рис. 1.2.2,а) или усеченного конуса (Рис. 1.2.2, б-в). Такие основания могут иметь берму, на которую устанавливается кессон (Рис. 1.2.2,г).

В процессе становления отрасли шельфовой добычи на месторождениях в море Бофорта было разработано и реализовано **пять различных типов кессонных островов**, которые, за редким исключением, после окончания проекта разбирались и кессон перемещали на новую точку, где основание для новой буровой платформы собиралось заново. Основания буровых платформ кессонного типа **широко использовались в американской и Канадской Арктике** [33,96,158,240,236]. Но, несмотря на то, что такое основание – остров обладает колоссальной массой, на грунт заполнения кессона и на донный грунт передаются колебания, генерируемые на внешней стороне кессона ломающимся с определенной цикличностью льдом.

Основания буровых платформ кессонного типа имели различные конструкции и разные наименования: Concrete Caisson (*Tarsiut Caisson*) – погружаемый восьмигранный в плане сборный кессон, состоящий из 4-х бетонных кессонов; *Single-Steel Drilling Caisson* (SSDC/SDC) – одиночный стальной буровой кессон; *Caisson-Retained Island* (CRI) – кессон сохраняющий остров; Glomar Beaufort Sea I (CIDS) – одиночное стале – бетонное буровое основание (кессон) использовавшееся на Американском шельфе моря Бофорта; Molikpaq Mobile Arctic Caisson (MAC) – цельносварной квадратный стальной наплавной кессон с грунтовым заполнением.

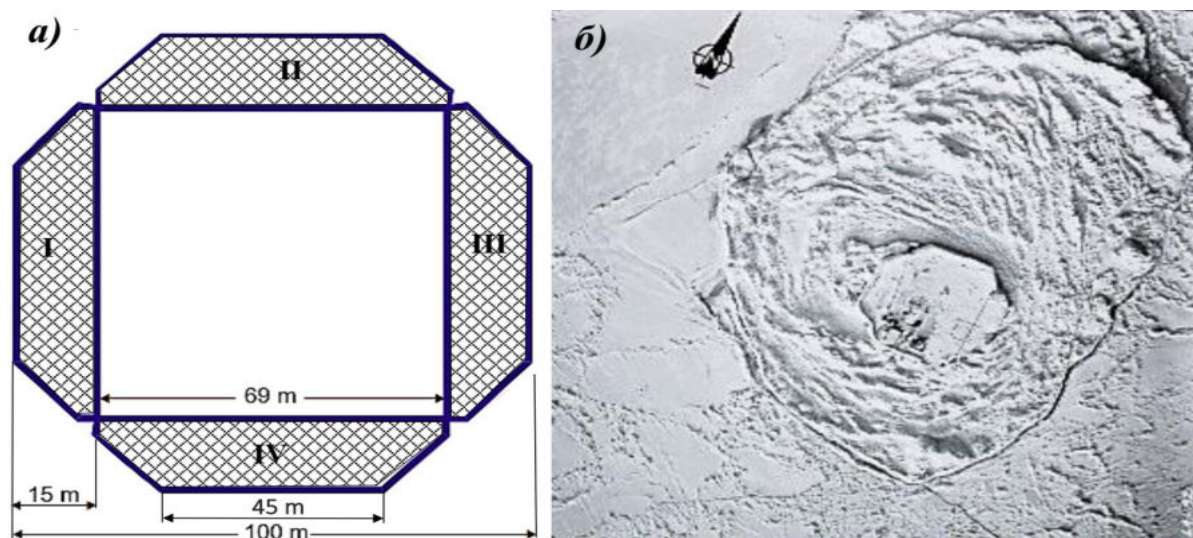


Рисунок 1.2.3 Основание буровой платформы Tarsiut (по островному типу – Рис. 1.2.3, г) по [240]: (а) – 4 бетонных кессона в плане; б) – основание с высоты после изготовления

Основание буровой платформы типа Tarsiut – было первым сооружением, где использовались кессоны. Его строительство развернуто на участках Tarsiut N-44 и N-44A

в 1981/82 годах в Американской части моря Бофорта (Рис. 1.2.3). Его конструкция достаточно сложная, восьмиугольная по внешнему периметру, но базирующаяся на четырех отдельных бетонных кессонах высотой 10 метров с **вертикальными стенами**.

Эти кессоны были сплавлены к месту бурения и сформированы в квадратную конструкцию, которая имеет 100 м в поперечнике на линии воды и стоит на отметке минус 6 м на заранее подготовленной песчаной берме с верхним основанием около 200 на 200 метров, покрытым слоем щебня.

Центральное ядро конструкции, размер которого составляет 69 м, засыпается песком, чтобы обеспечить поверхность для буровых работ и обеспечить устойчивость от ледовых нагрузок. Грунтовое основание возвышается на несколько метров над верхом кессонов. Эта структура не рассматривается как "мобильная", поскольку сложность разборки и соединения четырех кессонов и специальная подготовка основания ограничивают его мобильность. Сооружение было широко оборудовано для измерения ледовых нагрузок [236] как по соображениям эксплуатационной безопасности, так и для будущего проектирования.

Основания буровых платформ типа *Single-Steel Drilling Caisson* (SSDC) в виде **одинокных стальных кессонов** «произошли» от морских судов. Первое основание было построено из вышедшего из употребления танкера доставленного в море Бофорта в 1982 г. Сооружение имело длину 162 м, 53 м в ширины и 25 м высоты, **все внешние стороны вертикальны на ватерлинии**. В зимы 1982-83 и 1983-84 г.г. судно – основание использовалось для бурения в двух местах.

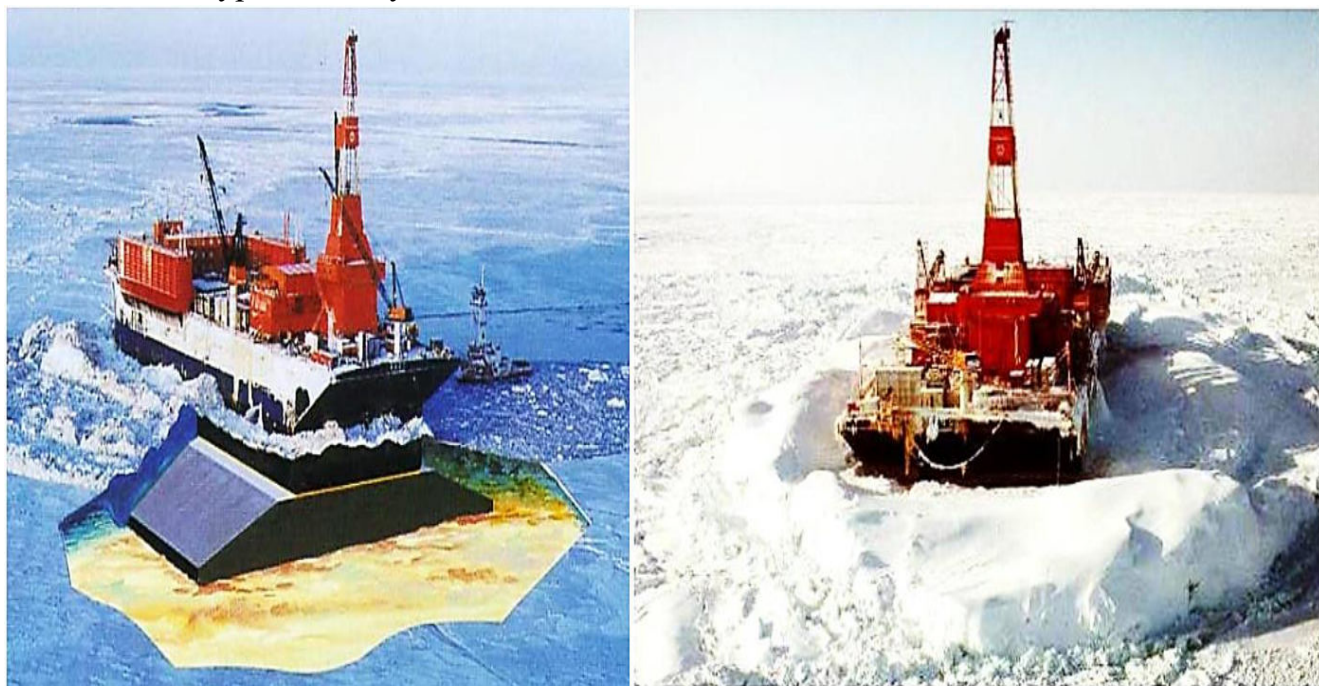


Рисунок 1.2.4 Основание буровых платформ типа SDC с опорной донной плитой:
(а) – презентация проекта и б) – в работе, с защитным поясом из льда - [240,236].

Для посадки судна на грунт насыпалась песчаная берма с отметкой верха не более 9 метров. В 1985-86 г.г. для этого SSDC было сконструировано и построено стальное основание в форме опорной плиты (*MAT (англ.)* – циновка, ковер), оно показано на Рис. 1.2.4.

Такое основание для буровой вышки было переименовано в **SDC**, оно способно работать круглый год на глубинах воды от 7 до 24 м без бермы и в самых разнообразных донных условиях. Оно использовалось зимой 2005/06 года компанией Devon Canada Corporation: было проведено бурение 60-ти скважин на глубине 13м воды.

Основания буровых платформ типа *Caisson-Retained Island (CRI)* – «кессона сохраняющего остров» в плане отличается от кессона Tarsiut, его кессон-оболочка острова состоит из 8 отдельных сегментов-кессонов (43 м х 12,2 м х 13,1 м), в собранном состоянии представляющих кольцо около 118 м в поперечнике и 12 м в высоту (Рис. 1.2.5). Две предварительно напряженные полосы стальной проволоки удерживают кессоны вместе после их сборки в кольцо, его внешняя стороны имеют наклон 30° от вертикали. Центральное ядро, ширина которого составляет 100 м, чтобы обеспечить поверхность для буровых работ и обеспечивают устойчивость от приложенных нагрузок засыпается песком. Первое сооружение типа CRI было построено в 1982-83 и развернуто в канадском море Бофорта летом 1983 г.



Рисунок 1.2.5 Основания буровых платформ типа *CRI*: (а) – собранная жесткая конструкция оболочки из 8 кессонов и б) – *CRI-Kaubvik* в работе, по [33,240,236]

Основание буровых платформ типа *Concrete Island Drilling Structure (CIDS)* – одиночное стале-бетонное основание буровой платформы, построенное в Японии по заказу Global Marine Development Inc. USA и названный «Glomar Beaufort Sea I». Это сооружение (Рис. 1.2.6) специально проектировалось как мобильное средство, предназначенное для работы в суровых ледовых условиях Арктики для глубин 11-15 м. Это первая в мире гибридная конструкция, состоящая из двух стальных модулей и бетонного модуля между

ними, предназначенного воспринимать ледовую нагрузку. Бетонный модуль средней части конструкции имеет квадратное сечение со стороной 71,3 м и высотой 13,4 м, он установлен на квадратную стальную платформу–кессон трапецевидного сечения со стороной 95,3 в основании и высотой 7,6 м, устанавливаемый на дно на точке бурения. Внутри нижней стальной платформы содержатся: шламохранилище и насосные агрегаты. Нижний кессон массой 13 000 т для сцепления с грунтом имеет стальную юбку высотой 1,5 м, способствующую увеличению сопротивления на сдвиг всей конструкции от действия ледовых полей. Бетонный кессон изготовлен как единое целое и собран из нижней, верхней и внутренних ж/б плит и имеет массу 35 000 т. Он заполнен цилиндрическими предварительно напряженными силосами, установленными вертикально по типу пчелиных сот с целью создания жесткости конструкции на воздействие горизонтальных ледовых сил на любую стену кессона извне. Эта система позволила достичь оптимального соотношения прочности и веса сооружения, то есть, не только перераспределить нагрузку на все элементы конструкции, но и сделать ее достаточно легкой за счет пустых силосов. Кроме того, эти ячейки дают возможность при их заполнении водой погружать основание на дно, равно как и обеспечивать его всплытие при их продувке.

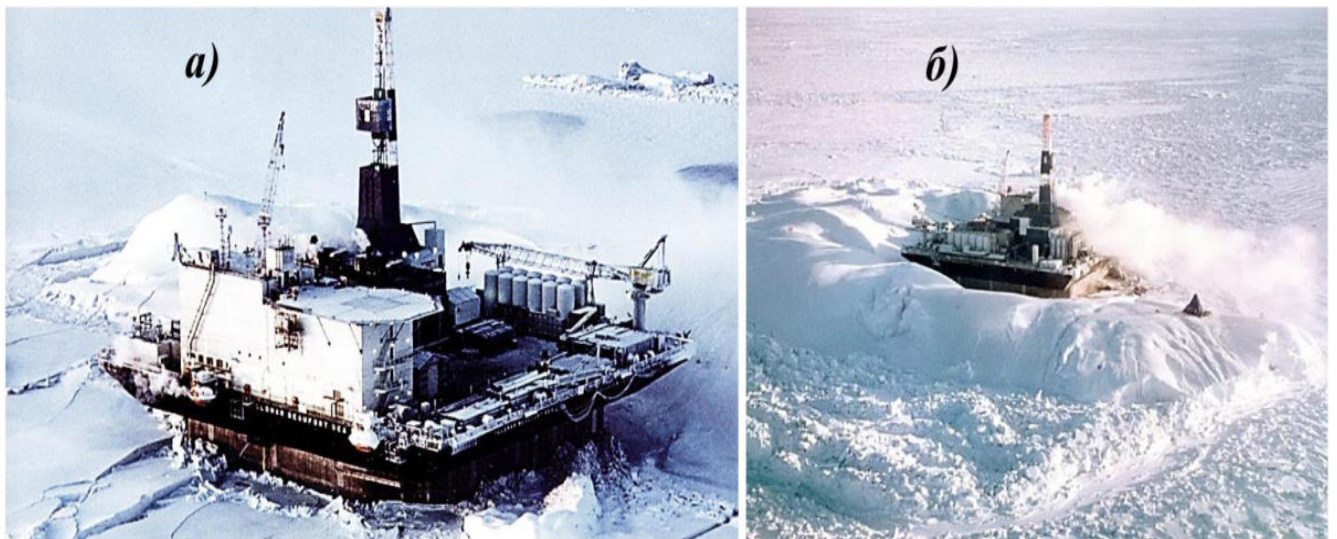


Рисунок 1.2.6 Основание буровой платформы типа CIDS: (а) –в начале зимы и б) – в зимний период с защитным барьером из набрызгового льда, по [240,236]

Верхний модуль (баржа) построен из двух соединенных вместе стальных корпусов по 88,5 x 41,5 x 7,9 м, общей массой 8 000 т. На палубе расположена буровая платформа, краны, жилой модуль, вертолетная площадка, внутри верхнего блока расположены цистерны с питьевой водой, балластные цистерны и цистерны с мазутом. Процесс дебалластировки может быть завершена в течение 3 дней при нормальных условиях. Строительство этого основания буровой платформы было завершено в 1984 году, она использовалась только в американском море Бофорта, с нее пробурено 7 скважин.

Основание буровых платформ Molikpaq Mobile Arctic Caisson (MAC) – выполнено в виде *стального цельносварного кольцевого кессона*, заполненного намывным грунтом и установленном на подводную берму, одновременно заместившую и часть слабого грунта в ее основании (Рис. 1.2.7). С 1984 года платформа эксплуатировалась в Канаде, в море Бофорта. Это одно из наиболее удачных конструктивных решений, обеспечивающее не только достаточное место для размещения бурового оборудования в комплексе, но и с точки зрения его устойчивости к воздействию ледовых нагрузок и, что очень важно – с точки зрения его мобильности, т.е. возможности повторных использований на новых местах бурения. Размеры платформы в плане 111х111 м, высота корпуса — 29 м (посадочная глубина — 15 м, высота палубы 14 м).

Эта платформа знаменита тем, что совершенно неожиданно как для оператора проекта, так и для проектировщиков этого очень дорогого сооружения в 1985 году во время воздействия больших ледовых полей с толщиной льда 1,5-2,5 м, дрейфующих со скоростью 1 м/с **платформа получила колебания от циклически разрушающегося льда с частотой, близкой к первой собственной частоте колебаний сооружения (1 гц), что поставило под угрозу потери устойчивости платформы на сдвиг по песчаному основанию,** либо с частью этого основания – насыпанной бермы. Если бы воздействие льда такой интенсивности на ослабло, катастрофа могла бы произойти, что повлекло бы не только остановку производства, но и возможный разлив нефти из разорванных буровых столбов, а также иные разрушения.

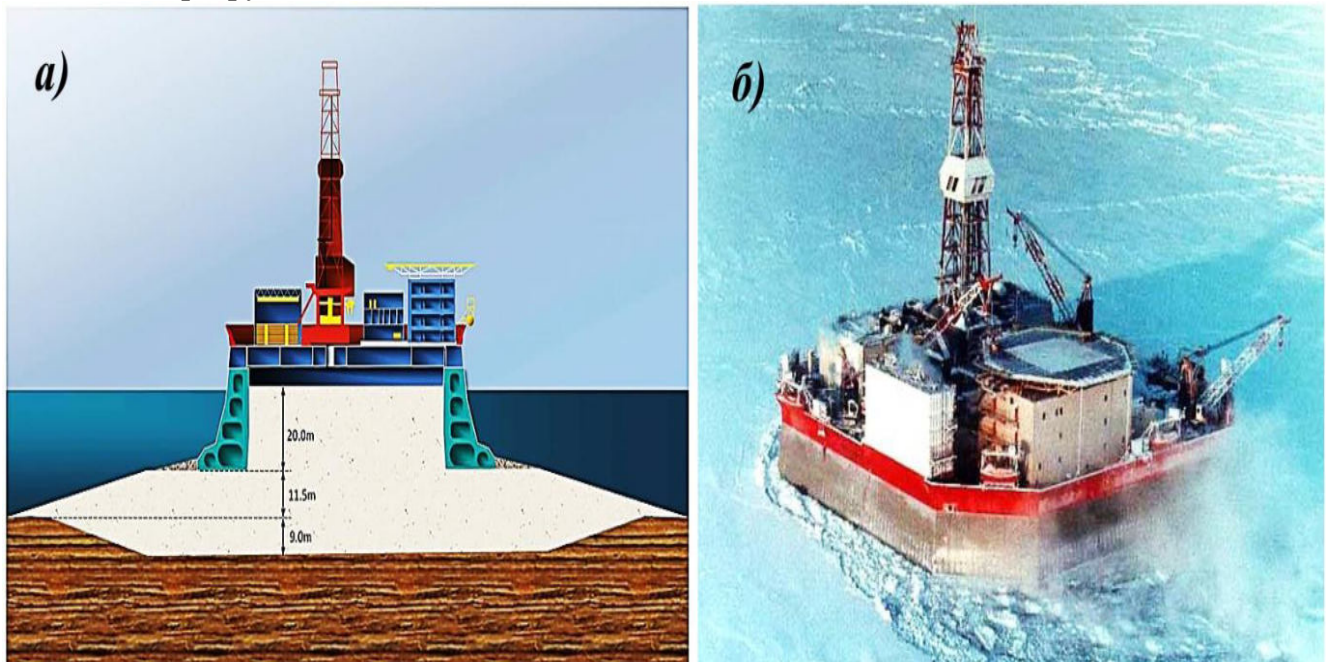


Рисунок 1.2.7 Основание буровой платформы Molikpaq Mobile Arctic Caisson (MAC) по [107,240,236]: а) – цельносварной квадратный наплавной кессон с грунтовым заполнением на насыпной берме; и б) – во время эксплуатации

1.2.3 Бетонные основания буровых платформ кессонного типа CONDEEP

Основания такого типа (Concrete Deep Water Structure) были разработаны международной инжиниринговой компанией «Квернер». Такие кессонные конструкции относятся к **гравитационному типу подводных оснований**, при этом они обладают характеристиками плавучести. Это позволяет сооружать их сразу в море, недалеко от берега (для этих целей подходят защищенные и достаточно глубокие заливы), затем буксировать на исходную позицию расположения платформы и погружать на морское дно. Существует множество реализованных проектов неподвижных платформ, спроектированных по концепции CONDEEP™. Главное преимущество этого типа устойчивость, благодаря жесткому креплению на морском дне они менее других подвержены смещениям под влиянием ветра, ледовых и водных масс. Платформы такого типа разработаны также и для условий Арктики [142] с гарантией их устойчивости с учетом ледовых нагрузок (Рис. 1.2.8), характерных в т.ч. и для условий Сахалина.



Рисунок 1.2.8 Гравитационные основания буровых платформ типа CONDEEP по [142]

Примером успешной реализации концепции CONDEEP™ для суровых климатических условий является морское ледостойкое основание платформы Хайберния (Hibernia), расположенная в 315 км к востоку от острова Ньюфаундленд (Канада) на глубине моря около 80 м и представляющая собой гравитационное основание (GBS – Gravity Base Structure) весом в 450 000 т с шириной в 105,5 м. Нефтедобывающая платформа Хайберния расположена в 315 км к востоку от острова Ньюфаундленд (Канада) на глубине моря около 80 м (Рис. 1.2.9). На Большой Ньюфаундлендской банке, где высота волны достигает 25 м, а акватория характеризуется сезонным присутствием ледовых полей с толщиной от 0,5 до 1,5 м и айсбергов. Высота кессона в конструкции – 85 м, а всего гравитационного основания – более 111 м при высоте всей конструкции почти 224 м.

Гравитационное основание для буровой платформы Хиберния спроектировано так, чтобы выдерживать столкновение с айсбергом весом более 1 млн. т без повреждений и до 6 млн. т – с некритическими повреждениями. Это обеспечивается весом всего основания с балластом в 1,2 млн. т, что обеспечивает устойчивость конструкции, а с целью обеспечения конструктивной жесткости подводное основание платформы сверху и снизу ограничено и укреплено круглыми горизонтальными пластинами. Нижняя базовая пластина в диаметре составляет 108 метров, верхняя поднимается на 5 метров над уровнем моря.

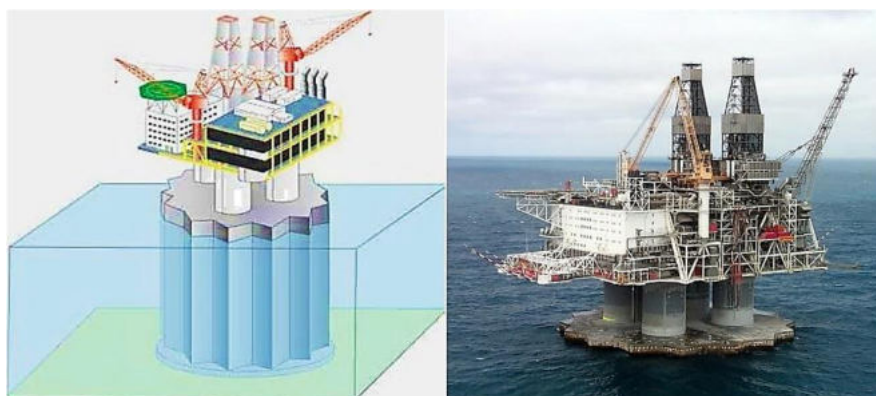


Рисунок 1.2.9 Морское гравитационное основание с буровой платформой Hibernia

1.2.4 Реализованные проекты ледостойких нефтегазопромысловых сооружений в Арктике и на Сахалине и перспективные конструкции

Основания буровых платформ для добычи нефти и газа на о. Сахалин. На первом этапе для разработки нефти и газа на Сахалинском шельфе нефтегазовые компании приобрели 2 основания буровых платформ, ранее использовавшихся в море Бофорта (Рис. 1.2.7 и Рис. 1.2.6, соответственно). Это основание типа Molikpaq Mobile Arctic Caisson (MAC), а также основание типа CIDS «Glomar Beaufort Sea I», описанные выше. Оба основания были существенным образом модернизированы.

Для использования на шельфе о. Сахалин к основанию ледостойкой платформы «Моликпак», предназначенной для бурения на глубине 15 м, в 1998 г. было добавлено 15-метровое промежуточное стальное основание [387], с ориентировочной массой - 14 591 т, которая заменяет грунтовую берму (Табл. 1.2.1,а).

Платформа получила название «Пильтун – Астохская -А» (ПА-А) по названию месторождения в Охотском море, где она с сентября 1998 года стала эксплуатироваться на Астохской площади месторождения в рамках проекта «Сахалин-2» в 16 км от берега на глубине 30 м. Перед установкой платформы потребовалось замена слабого грунта под ее

основание на песчано-гравийную подушку объемом 125 тыс. м³ грунта в котловане глубиной 6,5 м, а ядро основания было забалластировано песком в объеме около 190 тыс. м³ [387].

Таблица 1.2.1 Гравитационные передвижные основания буровых платформ на шельфе о. Сахалин

а) Проект Сахалин – 2, морская добывающая платформа «Пильтун-Астохская-А» (ПА-А/ «Моликпак»)



Масса платформы 37 500 т
Балласт – песок объемом 278 000 м³.
Установлена на Пильтун-Астохском месторождении в 1998 году

б) Проект Сахалин – 1, морская добывающая платформа «Орлан» (Glomar Beaufort Sea I)



Масса платформы около 70 000 т
Срок службы 45 лет
Установлена на месторождении Чайво в 2005 году

Таблица 1.2.2 Ледостойкие платформы на многоопорном основании типа CON-DEEP на шельфе о. Сахалин

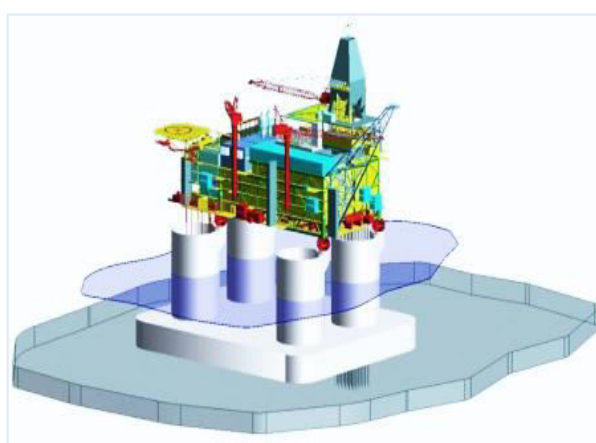


Проект Сахалин-1
Платформа Беркут, месторождение Аркутун-Даги

Масса платформы – 200 тыс. т;
Высота платформы – 144 м;

Проект Сахалин – 2
Платформа «ПА-Б», месторождение Пильтун-Астохское

Масса платформы – 118 тыс. т;
Высота платформы: 121 м;



Платформа «Лунская-А», газоместорождение Лунское

Масса платформы – 133 тыс. т;
Высота платформы: 174,5 м;

Основание: Глубина установки – 35 м; Размеры: 133 м х 100 м х 13,5 м; Диаметр опоры: 25,6 м; Высота опоры: 54,6 м; Высота основания: 68 м; Масса основания: 160 000 т. Верхнее строение: Размеры: 105 х 60 м; Масса – 42 000 т.	Основание: Глубина установки – 32 м; Размеры: 94 м х 91,5 м х 11,5 м; Диаметр опоры: 24 м; Высота опоры: 56 м; Высота основания: 67,5 м; Масса основания: 90 000 т. Верхнее строение: Размеры: 100 х 50 м; Масса – 28 000 т.	Основание: Глубина установки – 48 м; Размеры: 108 м х 88 м х 13,5 м; Диаметр опоры: 20 м; Высота опоры: 56 м; Высота основания: 69,6 м; Масса основания: 103 000 т. Верхнее строение: Размеры: 100 х 50 м; Масса: 21 800 т.
Установка закончена в 2014 г.	Сдана в эксплуатацию в 2008 г.	Сдана в эксплуатацию в 2008 г.



Основание типа CIDS «Glomar Beaufort Sea I» для участия платформы в проекте «Сахалин-1» (Табл. 1.2.2,б) было переоборудовано на ОАО «Амурском судостроительном Заводе» и получило название «Орлан» [388]. Модернизированная бурово-производственная платформа "Орлан" рассчитана на эксплуатацию в течение 45 лет в морских субарктических условиях в диапазоне от -35°C до $+35^{\circ}\text{C}$).

В 2008 – 2014 г.г. на шельфе Сахалина были установлены еще три бетонных основания, выполненные по технологии CONDEEP™ (Табл. 1.2.2).

Эти три основания буровых платформ - гравитационного типа с четырьмя опорами спроектированы и построены в порту Восточном на Дальнем Востоке России компаниями Aker Kvaerner Technology AS и Quattrogemini OY. Такие морские платформы, установленные на Сахалинском шельфе в России представляют собой примеры новых, передовых проектных решений, которые могут выдержать в течение проектного срока эксплуатации (40 лет) такие экстремальные условия эксплуатации как воздействие дрейфующего льда и сильных землетрясений. Здесь впервые в мире применена система сейсмозащиты до 9 баллов. При этом толщина железобетона в конструкции основания колеблется от 0,5 до 0,75 метра.

Основание буровой платформы Приразломная было введено в эксплуатацию в мае 2013 г. Этот проект является полностью российским: проектирование, изготовление

и возведение платформы на месте установки выполнено полностью российскими подрядчиками с использованием российских материалов, что показывает принципиальную готовность России к самостоятельному освоению арктических месторождений в суровых условиях.

Основание платформы «Приразломная», также как и основание платформы Molikraaq выполнено на кессоне с квадратным основанием, но с размерами 126 x 126 м в плане. А нижний блок основания, в отличие от стального кессона Molikraaq – это кессон с трехметровыми бетонными стенами, покрытыми слоем плакированной стали толщиной 4 см, устойчивой к износу и коррозии (Рис. 1.2.10, а).

Конструкция основания дополнена промежуточным блоком – палубой, на которую установлена буровая платформа и модули производственного и бытового назначения. По периметру устроен защитный ледовый дефлектор высотой 15 м. Платформа надежно удерживается на дне моря за счет своего гравитационного веса, превышающего 500 тысяч тонн, и после установки фактически стала искусственным островом высотой 141 м.

Кессон «Приразломной» установлен непосредственно на дно, поскольку глубина моря на месторождении небольшая — всего 19,2 м. Сам кессон, разделенный на отсеки, является одновременно хранилищем добытой нефти, а система хранения нефти на платформе предусматривает «мокрый» способ размещения сырья в резервуарах. При этом поток сырья, поступающий в хранилище, вытесняет балластную воду, и наоборот, при откачке нефти в танкер происходит замещение её балластной водой. Таким образом все скважины «Приразломной» находятся непосредственно внутри платформы и с водой не контактируют, а её основание одновременно является буфером между скважиной и открытым морем.

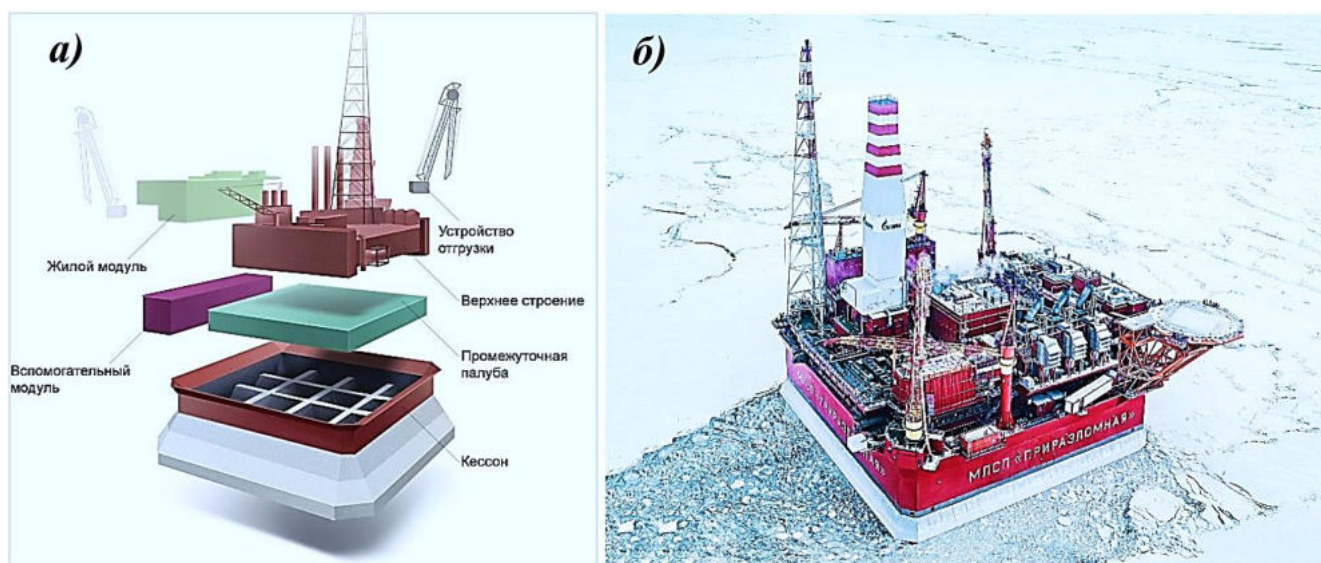


Рисунок 1.2.10 Основание платформы Приразломная со стале-бетонным кессоном: а) – блочная компоновка конструкции по [396]; б) – платформа в работе по [306]

В процессе эксплуатации конструкций морских оснований буровых платформ в море Бофорта, на Сахалинском и Арктическом шельфе Печорского моря сегодня **практически доказано**, что они приспособлены для круглогодичной эксплуатации в суровых арктических условиях. Эксплуатируемые платформы хорошо зарекомендовали свои возможности работы в условиях дрейфующих арктических льдов и соответствуют стандартам безопасности и охраны окружающей среды.

Анализ условий работы существующих сооружений показал, что наиболее перспективными конструкциями с учетом опыта их эксплуатации в суровых ледовых условиях являются **конструкции кессонного типа**. Наибольшее распространение в классе таких сооружений получили **стационарные морские ледостойкие основания (МЛО)** различной конструкции: морские сооружения, состоящее из верхнего строения и опорного основания, зафиксированное на все время использования на грунте и являющееся объектом обустройства морских месторождений нефти и газа [33,240,236, 278,288,336,395].

Конструктивные решения МСП существенно зависят от характера ледовых условий и глубины моря. Интуитивно понятно, что конструкция МЛО должна обладать как можно меньшей площадью соприкосновения со льдом, чтобы не повышать значение горизонтальной силы давления льда на сооружение, и иметь высокую устойчивость на сдвиг и опрокидывание. В этой связи предпочтительным вариантом для опорного блока может быть одиночная цилиндрическая или коническая колонна (опора) ледостойкой конструкции. Эффективность моноопорной конструкции состоит также и в том, что обломки льда и блоки ледового поля, «прорезаемого» одиночной опорой сооружения, «обтекают» ее, мало задерживаясь на ней, в то время как в многоопорных конструкциях наблюдаются нагромождения льда в межопорном пространстве (вплоть до самого дна) и, как следствие, глобальная нагрузка на сооружение значительно повышается. То же самое происходит на конструкциях со сплошными длинными прямыми бортами в области ватерлинии.

Следует иметь ввиду также, что ледовые нагрузки даже на одинаковые конструкции, расположенные в непосредственной близости друг от друга, могут существенно отличаться. Такая ситуация требует проведения многолетних ледовых исследований непосредственно в районах установки МЛО для обоснования реальных значений ледовых нагрузок и прогноза условий их работы в течение срока эксплуатации месторождения.

Во ФГУП Крыловский государственный научный центр (ГНЦ, Санкт-Петербург), в ФГБОУ ВПО РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, ВНИИЭгазпром, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и в ряде других российских организаций на базе проведенных глубоких тео-

ретических и экспериментальных исследований подготовлены ряд перспективных технических решений, которые могут быть использованы для освоения и обустройства морских нефтегазовых месторождений в ледовых условиях [286,288,373,410].

1.3 Существующая нормативная база по расчетам ледовых нагрузок на сооружения и ее развитие в международном стандарте

1.3.1 Подходы к формированию первой методологии расчета ледовой нагрузки на сооружение от воздействия ледового поля

Еще в конце 19 и самом начале 20 века, в период зарождения методов определения нагрузки от ударов льдин в период ледохода по опорам (быкам) железнодорожных мостов, в России *силовой подход* к определению **ледовой нагрузки на вертикальные опоры сооружений** в начале рассматривался наряду с *энергетическим подходом*. Но, несмотря на неочевидность адекватности и существенные трудности реализации, вот уже почти 100 лет метод расчетов ледовой нагрузки, основанный на силовом подходе механики Ньютона к интерпретации процесса разрушения льда на контакте с сооружением является основой Норм проектирования в РФ.

Гипотеза силового подхода. Появившийся в начале 20 века в России и существующий сегодня нормативный метод расчёта ледовой нагрузки на опоры сооружений основывается на втором законе Ньютона, исходящего из принципа равенства сил действия и противодействия: силы воздействия льда на сооружение и силы сопротивления конструкции сооружения этому воздействию. В таком «силовом» подходе время действия силы во времени взаимодействия ледового поля с сооружением не рассматривается как процесс, а время – как его базовый параметр. Силовой принцип расчета ледовой нагрузки изначально предполагал неограниченную жесткость конструкции при воздействии на которую лед должен разрушаться. Предельной силой в такой модели расчета ледовой нагрузки (Рис.1.3.1) принимается сумма предельных для льда давлений на площади контакта, где за предельное давление рекомендуется принимать предел временной прочности льда σ_0 , получаемый испытаниями малых образцов на сжатие:

$$F = B \cdot h \cdot \sigma_0 \text{ (Тс)}. \quad (1.3.1)$$

Но, следует отметить, что в начале 20 века для создания модели (расчетной формулы) ледового давления на опоры сооружений изначально инженером Комаровским А.Н. [343] рассматривался энергетический подход, основанный на гипотезе о том, что для

объективного математического описания процесса взаимодействия льдины и опоры моста следует рассматривать баланс кинетической энергии льдины, затраченной на работу, совершенную контактной силой в процессе разрушения льда. Комаровский А.Н. свою гипотезу сформулировал в 1932 году, исходя из справедливого предположения о том, что сила удара, сконцентрированная на площади касания льда врезающейся частью, может превысить временное сопротивление льда раздроблению [343]. Тогда часть силы удара пойдет на работу по раздроблению льда. Для математической записи этой гипотезы он использовал теорему о равенстве количества движения льдины импульсу силы ее воздействия на опору сооружения: $M \cdot v = P \cdot t$. Предполагалось, что процесс взаимодействия льдины и сооружения носит динамический характер и что инженерная конструкция должна оставаться жесткой и не потерять устойчивость, в то время как лед в зоне контакта кромки льдины с поверхностью опоры сооружения должен разрушиться при достижении предельной концентрации энергии в контактной зоне (напряженном объеме) льда с поверхностью сооружения.

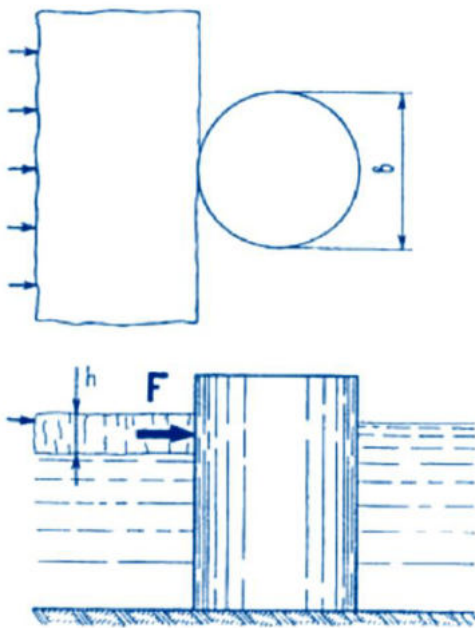


Рис. 1.3.1. Схема приложения нагрузки по [420] от движущегося ледяного поля на отдельно стоящую **вертикальную** опору

F – воздействие ледяных полей;

h – толщина ледяного поля;

b – ширина опоры

единицу объема раздробление льда. Поэтому Комаровский А.Н. [343] упростил задачу, задавшись фиксированным временем остановки льдины $t = 1с$ и необходимыми ему кинематическими и геометрическими параметрами льдины, и впервые записал расчетную формулу определения ледовой нагрузки на сооружение в виде:

Решение задачи в такой постановке требовало экспериментального определения удельной работы (энергии), затрачиваемой ледовым полем на раздробление единицы объема льда, но на тот период времени не представлялось возможным определить значения этой величины. Но работа, затрачиваемая «на раздробление льда», как существенная часть кинетической энергии льдины, Комаровским А.Н, также как и его современниками – инженерами, не была выявлена, поскольку решение теоремы относительно контактной силы требовало интегрирования по времени равенства импульсов, приведенного выше. Это, в свою очередь, требовало знания либо времени полной остановки льдины (t), либо глубины разрушения ее кромки (y) – пути совершения силой F «работы по раздроблению льда», либо введения в расчеты функции площади контакта от времени или пути, либо знания удельных затрат энергии льдины на еди-

$$F = B \cdot h \cdot 200 \text{ (т)}. \quad (1.3.2)$$

где: 200 Т/м^2 – предел временного сопротивления льда при сжатии образца.

Использование в формуле (1.3.1) определения силы давления льда, имеющего толщину h , на поверхность сооружения шириной B (Рис. 1.3.1) временного сопротивления льда на сжатие $R_c = 200 \text{ (Т/м}^2\text{)}$ объяснялось тем, что к этому периоду времени имелись результаты испытаний образцов льда на сжатие. В частности, проектировщиками и строителями первого ледокола «Ермак» под руководством адмирала С.О. Макарова и академика А.Н. Крылова в 1900г. проводились специальные исследования прочности пресного льда «на раздробление при одноосном нагружении». А уже в 1903 г. инженером Н. Рыным в его работе «Ледорезы» [407] было опубликовано первое обобщение всех известных к тому времени экспериментально полученных данных о значениях «сопротивления льда на раздробление».

Энергетический подход. Следует заметить, что именно в годы появления и становления силового подхода к расчету ледовой нагрузки на сооружения в мире появилась и начала развиваться *энергетическая концепция описания разрушения твердых тел* при развитии в них трещин, выдвинутая А. Гриффитсом в конце 20-х годов прошлого века. Хотя, до применения в инженерной практике революционной идеи А. Гриффитса были еще долгие десятилетия, с того времени рассмотрение всякого процесса взаимодействия, приводящего к разрушению контактирующих тел, уже могло описываться в рамках чисто энергетической концепции через анализ обмена энергиями определенного типа. Как известно [339,399,413,450], А. Гриффитс сформулировал два условия, согласно которым распространение трещины происходит там и тогда, где образовались условия минимума необходимых для этого процесса затрат энергии и, кроме того, в процессе разрушения должно происходить преобразование энергии.

Аналитический обзор литературных источников, посвященный появлению и становлению нормативного метода расчета ледовой нагрузки на сооружения в России и Советском Союзе показывает, что выбор силового подхода к решению проблемы не был безальтернативным.

Так, опираясь на рассуждения Комаровского А.Н. [343] и других исследователей, инженер П.А. Кузнецов своей работе [360] также говорит о том, что «всякий удар льдины ... сопровождается разрушением льда в определенном объеме. Процесс удара льдины может быть рассматриваем, как *цепь последовательных этапов разрушения слоев льда, причем каждому этапу соответствует некая длительность, некоторый объем разрушения льда и затрата некоторой части кинетической энергии льдины*». Далее он составляет уравнение энергетического баланса разрушения льда останавливающейся после удара о сооружение льдины толщиной h и с размерами в плане $(b \cdot l)$. Он пишет [360], что «...ра-

бота, произведенная льдиной до полной ее остановки, равная действующему в этот момент напряжению σ , умноженному на объем раздавленного льда Q , может быть приравнена живой силе льдины до столкновения»:

$$\sigma \cdot Q = l \cdot b \cdot h \cdot \rho \frac{v^2}{2}. \quad (1.3.3)$$

Если внимательно исследовать текстовые описания авторов того времени процесса раздавливания льда на опоре сооружения, а также математическую запись модели разрушения льда, принятую Кузнецовым П.А. [360], можно заключить, что в данном случае в левой части формулы (1.3.3) в виде произведения σQ предполагается запись потенциальной энергии сопротивления некоторого объема льда Q разрушению. Правая часть равенства (здесь ρ – плотность льда) есть не что иное, как кинетическая энергия движущейся льдины (до начала второй половины XIX века называлась живой силой), которая, согласно закону сохранения энергии, *“расходуется на раздробление некоторого объема льда Q , которое происходит при постоянном напряжении в месте разрушения σ ”* [360]. Здесь Кузнецовым П.А. была допущена некорректность: он перемножил объем разрушенного льда и давление *«в месте разрушения σ »*, предположив его равномерное распределение в этом теле.

На самом деле, эта запись – *формула скоростного напора в жидкости* или газе, имеющего плотность ρ , которая получается при сокращении объема разрушенного льда слева и справа в рассматриваемом равенстве (1.3.3). Был получен результат с размерностью давления ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} = \text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$), как скоростной напор на тело, движущееся в вязкой жидкости – сплошной среды иного фазового состояния, нежели твердый лед. Очевидно, что рассматриваемая нами формула (1.3.3) приведена как иллюстрация *распределения баланса энергии*, как общая запись, безотносительно формы и размеров опоры, поэтому произвести прямой расчет силы давления льда на сооружение по ней нельзя.

В то же время, учитывая, что в такой постановке задачи лед должен рассматриваться как сплошная среда (твердое тело) и напряжения в объеме его контактной зоны с опорой распределены не равномерно, в данном случае слева в формуле (1.3.3) будет корректным применить в качестве критерия разрушения критическую плотность энергии в единице объема льда – ε ($\text{Дж}/\text{м}^3$), что не изменит построение и математическое описание модели разрушения льда процитированных авторов. *При этом формула энергетического баланса процесса внедрения опоры сооружения в кромку льдины превратится в корректную математическую запись этого сложного физического процесса.*

1.3.2 Утверждение первой нормативной методологии расчета ледовой нагрузки на сооружения

Несмотря на то, что Щаповым Н.М. в 1933 г. был предложен прием введения в расчет ледовой нагрузки на сооружение геометрических размеров льдины и ее скорости [456], в 1939 г. в проект *Технических Условий (ТУ НИИГ)* в качестве основы нормативного метода определения силы удара о сооружение расчета ледовой нагрузки в этот документ была применена формула (1.3.2), основанная на работе А.Н. Комаровского и постулирующая силовой подход в расчетах ледовой нагрузки.

Первым государственным нормативным документом по расчету сил ледового воздействия на морские сооружения был разработанный П. А Кузнецовым по исследованиям А.Н. Комаровского *ГОСТ 3440-46 "Нагрузки на гидротехнические сооружения. Нагрузки ледовые."* [321], который был утвержден и закрепил вид расчетной формулы в виде:

$$P = b \cdot h \cdot R_{сж}. \quad (1.3.4)$$

Эта формула: «Сила воздействия льда на сооружение пропорциональна поверхности контакта при равномерном распределении по ней контактного давления, равного пределу прочности льда на одноосное сжатие» - самая ранняя МОДЕЛЬ давления льда.

ГОСТ 3440-46 по своей сути и содержанию ВПЕРВЫЕ НОРМАТИВНО утвердил первую МЕТОДОЛОГИЮ расчета ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения, поскольку, помимо расчетной Модели (формула 1.3.4) этот документ регламентировал также и правила определения предела временной прочности льда $R_{сж}$ испытаниями малых образцов на сжатие, как критериального значения контактного давления, определяющего начало разрушения льда.

В данном случае выбор критерия $R_{сж}$ был продиктован удобством расчёта вычисляемых величин и доступностью экспериментального определения разрушающего значения критериальной величины. По подобию имевшейся практики определения временного предела прочности других материалов, предельные контактные давления льда на сооружение должны были определяться как *предел временной прочности σ_0 кубического образца*, подвергавшегося сжатию. Таким образом, гипотеза о том, что разрушение льда в зоне контакта происходит по схеме напряженно-деформированного состояния льда, аналогичной одноосным испытаниям малых образцов, была возведена в «Нормы».

При этом, ГОСТ 3440-46 распространял свое действие на расчеты ледовой нагрузки как на речные гидротехнические сооружения, так и на морские. Но здесь, в силу слабой изученности явлений взаимодействия льда с опорами сооружений, по оценке К.Н. Коржавина [356], имелся «ряд спорных положений, например: завышен предел прочности пресноводного льда при сжатии, равный $1 \div 2$ МПа ($100 \div 200$ тс/м²); не учитывалось сложное напряженное состояние, возникающее при внедрении опоры в надвигающееся

ледяное поле ("местное смятие"); весьма приблизительно оценивалась роль формы опоры в плане; не учитывалась скорость нагружения льда и пр.».

1.3.3 Эволюция нормативного метода расчетов ледовой нагрузки в СССР и РФ на основе экспериментальных исследований прочности речного льда

Использование *силового подхода* в расчетах ледовой нагрузки на гидротехническое сооружение (формула 1.3.4) обусловило широкое развитие работ по экспериментальному определению прочности льда путем испытаний малых образцов на сжатие. Не останавливаясь на соответствии формы и размеров образца льда, как представительного объема напряженного участка ледовой плиты, заметим, что размеры образца, способ и условия его нагружения сжимающей нагрузкой были и остаются регламентировались соответствующими нормативными документами.

Предел временной прочности льда σ_0 , получаемый при испытании малых кубических или призматических образцов на одноосное сжатие, как основа расчетного нормативного метода, а также условия применения этого параметра в расчетах требовали постоянного экспериментального подтверждения метода. Это связано с уникальностью льда как природного материала, широким спектром различий его основных параметров, таких как структура, температура, пористость и соленость в разных водоемах и в разное время года. Поэтому, начиная с 1890-х годов и до конца 20 века изучением физико-механических *характеристик пресного льда*, кинематикой движения льдин и их взаимодействием с устоями мостов, бычками плотин, опорами причалов занимались исследователи и инженеры: Алейников С.М., Берденников В.П., Бовин В.Т., Будников Н.Д., Бутягин И.П., Вейнберг В.П., Войтковский К.Ф., Гамаюнов А.И., Гладков М.Г., Дубах А.А., Зарецкий Ю.К., Зубов Н.Н., Зылев Б.В., Лавров В.В., Карташкин Б.Д., Козлов Д.В., Комаровский А.Н., Кореньков В.А., Коржавин К.Н., Кузнецов П.А., Моргунов В.К., Назаров В.С., Николаи Л.Ф., Панфилов Д.Ф., Песчанский И.С., Петров И.Г., Петруничев Н.Н., Пинегин В.Д., Проскуряков В.А., Птухин Ф.И., Рывлин А.Я., Рынин Н.А., Савельев Б.А., Трегуб Г.А., Трусков П.А., Шаталина И.Н., Шмелева Л.А., Шульман А.Р., Щапов Н.М. и ряд других исследователей.

Среди зарубежных исследователей этой проблемой в те годы занимались: Андерсон Д.Л., Ассур А., Голд Л.В., Дэнис Дж.В., Ковач А., Меллор М., Мишель Б., Нансен Ф., Нилл К.Р., Паундер Э., Петрич С., Рейнике К.М., Ремер К.А., Фредеркинг Р., Шварц И., Шульсон Е.М., Уикс У.Ф. и некоторые другие.

ГОСТ 3440-46 действовал в СССР до 1959 года. В 1959 г. вышли в свет "Технические условия Госстроя СССР для определения ледовых нагрузок на речные гидротехнические сооружения" (СН 76-59), которые, по мнению специалистов [356], выгодно отличались от прежних разработок и норм. В этом документе были учтены результаты многочисленных исследований прочности льда в разных регионах страны и предел прочности

речного льда при сжатии (с учетом явления местного смятия) был снижен до $0,45+0,75$ МПа ($45+75$ тс/см²), введен более обоснованный учет влияния опоры в плане.

Непрерывно продолжавшиеся исследования проблемы в Новосибирском институте инженеров железнодорожного транспорта [355,353,352,354], Всесоюзном НИИ гидротехники (ВНИИГ) [301,347,351,357], Государственном Гидрологическом институте (ГГИ), Сибирском отделении Академии наук СССР [354,358], позволяли постоянно уточнять методику оценки ледовых нагрузок на опоры сооружений. По результатам исследований отдельных авторов и исследовательских коллективов в период с 1946 по 1975 годы методика определения параметра значение σ_o для расчетов давления пресноводного льда на речные сооружения пересматривалась и уточнялась несколько раз: взамен СН 76-59 были разработаны и утверждены «Строительные нормы» СН 76-62, затем СН 76-66 [418].

Но во всех новых «Нормах» **базовый подход оставался неизменным**: величину максимально возможного давления льда, возникающего при взаимодействии крупного ледового поля с опорой сооружения с **вертикальной режущей гранью** (в период первой подвижки льда или в период полного ледохода) рекомендовалось оценивать по формулам:

– при прорезании льда сооружением

$$P_1 = m_j A R_p b h_{\text{л}}, \quad (1.3.4)$$

– при остановке льдины у сооружения

$$P_2 = 0,43 v h_{\text{л}} \sqrt{\Omega A} R_p m_{\varepsilon} \quad (1.3.5)$$

За расчетное значение силы ледового давления должно приниматься наименьшее из определенных по формулам (3) или (4). В этих формулах обозначено: b – ширина опоры на уровне ледохода, м; $h_{\text{л}}$ – расчетная толщина льда, м; A – климатический коэффициент для различных районов страны ($0,75+2,25$); $R_p = k_j \cdot \sigma_o$ – предел прочности льда при сжатии (с учетом местного смятия); σ_o – предел прочности льда при одноосном сжатии; k_j – коэффициент, учитывающий явление местного смятия; m_j m_{ε} – коэффициенты, учитывающие форму опоры в плане и скорость ледового поля; v – расчетная скорость движения ледового поля, м/с; Ω – площадь ледяного поля, м².

Все рассмотренные выше нормативные документы регламентировали правила расчета ледовой нагрузки только на **сооружения, возводимые в руслах рек**, и даже исключали водохранилища. Поэтому, после введения в действие СН 76-59 и прекращения действия ранее действовавшего ГОСТ 3440-46 – *первого в СССР нормативного документа*, предусматривавшего оценку ледовых нагрузок как на речные, так и на морские гидротехнические сооружения, в течение почти 30 лет в Советском Союзе не было нормативного документа, регламентирующего правила оценки ледовых нагрузок на морские сооружения. Для удовлетворения потребности в таких Нормах отдельные ведомства, начиная

с того периода и сих пор, разрабатывают ведомственные нормативные документы [303,304,335,422,429].

Результаты многочисленных исследований, включающие и измерения ледового давления на бычки плотин и опоры мостов, позволили **уточнить методику оценки ледовых нагрузок** на опоры сооружений и **рекомендовать в формуле расчета ледовой нагрузки предел прочности льда при сжатии σ_0 принимать с учетом коэффициентов, учитывающих форму опоры, явление местного смятия, плотность контакта льда с сооружением.** Была показана необходимость учета неравномерности распределения прочности льда по его толщине в плите и ряд других. Эти положения были внесены в изданную Госстроем СССР в 1975 году новую главу СНиП П-57-75 "Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)" и в ее вводной части указывается, что новые нормы должны соблюдаться при проектировании вновь строящихся и реконструируемых **речных и морских гидротехнических сооружений**.

Введение общих норм (как для речных, так и для морских сооружений), естественно, потребовало **учета особенностей работы морских сооружений** и, в частности, следующих:

а) так как морские сооружения (причальные пирсы, волноломы и оградительные сооружения, а также отдельно стоящие не широкие сооружения) имеют различные размеры по ширине b , то коэффициент k_j , учитывающий местное смятие, должен быть принят различным для различных соотношений $b/h_{\text{л}}$ от 0,5 до 2,5 (таблица 20 СНиП). Этот коэффициент неявно включался в величину расчетной, прочности льда с учетом местного смятия, принимавшейся в 0,45+0,75 МПа (45-75 тс/м²);

б) морские гидротехнические сооружения, в отличие от речных сооружений, могут испытывать воздействие ледяных масс не только весной при слабом льде, но во все периоды года, что побудило составителей СНиП повысить расчетный предел прочности льда при сжатии до 0,45+0,75 МПа (45-75 тс/м², без учета местного смятия), т.е. принять его увеличении: в 1,75+2 раза по сравнению с рекомендациями СН 200-62 и СН 76-66;

С учетом появившихся новых результатов глава СНиП П-57-75 была обновлена и ее новая редакции - СНиП 2.06.04-82* [419] получила несколько дополнений, актуализировавших ее. Позднее несколько отдельных дополнений уже в эту новую редакцию актуализировали СНиП 2.06.04-82* и эта глава получила современную индексацию в системе нормативных документов по строительству Свод Правил [420] **СП 38.13330.2012**. Этот документ не изменил методологической базы расчетов ледовых нагрузок на морские сооружения, в него лишь были внесены рекомендации по учету особенностей строения и свойств льда и ледяного покрова, по применению единого метода испытания образцов, проведения статистической обработки результатов и выбору расчетного параметра прочности льда на основании апробированных методов.

В данном разделе, на основании анализа появления и развития методологии нормирования расчетов ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения показано, что уже изначально, на стадии своего формирования, методология силового подхода к расчету ледовой нагрузки на сооружения с использованием в качестве критерия разрушения льда «временного сопротивления льда на сжатие», получила *безальтернативное развитие в течение практически столетнего периода разработок проблемы*, т.к. она была закреплена в качестве нормативного метода и ее основные составные части продолжают оставаться неизменными со времени создания в 1939 г. проекта первого нормативного документа в СССР – ГОСТа 3440-46.

1.4 Об области применения методологии расчета ледовой нагрузки по статическим методам методу без учета динамики разрушения льда

Важнейшим условием в обеспечении надежности метода расчета ледовой нагрузки являются как выбор **модели** (механизма, гипотезы) **разрушения** льда, адекватной реальному процессу, так и **соответствующего этой модели критерия прочности** этого уникального природного материала.

Методология определения ледовой нагрузки, принятая в качестве нормативной в Советском Союзе и России **подверглась обширной критике со стороны многих западных исследователей** и не только из-за принятой расчетной модели, не отвечающей общим механическим концепциям, но и из-за несоответствия используемого в этой модели критерия прочности льда. Уже в семидесятые годы прошлого столетия, в начале периода активизации теоретических и экспериментальных исследований проблемы воздействия льда на морские сооружения, обусловленной интересом общества к добыче углеводородов на шельфах замерзающих морей, некоторые исследователи высказывали достаточно кардинальные мнения по поводу необоснованности применения прочности льда, получаемой испытаниями малых образцов в расчетах нагрузки на сооружения, подвергая сомнению возможность использования «советской методики определения ледовой нагрузки на опоры речных мостов» для морских условий.

1.4.1 Исследования феноменологических свойств морского льда и морского ледового покрова для учета в методе расчета ледовой нагрузки на МЛЮ

Потребности в расширении сроков и географии развивающегося мореплавания в ледовитых морях в послевоенный период уже в середине века выдвинула задачу обеспечения надежности круглогодичной эксплуатации морских маяков, в частности на Балтике. А немного позже, в начале 1970-х годов, в связи с потребностью *промышленного освоения месторождений нефти и газа на шельфе* Аляски и Канады, а также открытием

месторождений углеводородов на *арктическом и сахалинском шельфах России*, в северной части Каспийского моря и Бохайского залива Желтого моря исследования этого вопроса приняли особенно интенсивный характер и *проблемой обеспечения надежности морских отдельно стоящих сооружений* стали заниматься не только в СССР, но и, в первую очередь - в США, Канаде, а также в Германии, Норвегии, Финляндии, Швеции и, позднее в Китае. В этот период впервые были выполнены эксперименты по определению силы прорезания модельного льда в ледовом бассейне Арктического и Антарктического института в СССР [284] и натурного льда моделями опор (свай) в США и Канаде. В заливе Кука на Аляске была построена опытная платформа на цилиндрических сваях для измерения ледовых сил в натуре [190].

Изучением *прочностных параметров морских льдов* и всех аспектов их взаимодействия с сооружениями в СССР в этот период и уже в новом веке занимались, в том числе в докторских и кандидатских диссертациях: Астафьев С.В., Апполонов Е.А., Афанасьев В.П., Беккер А.Т., Богородский В.В., Большев А.С., Вершинин С.А., Гаврило В.П., Гладков М.Г.; Гольдштейн Р.В., Гусев А.В., Гомольский С.Г., Долгополов Ю.В., Доронин Ю.П., Епифанов В.П., Занегин В.Г., Зубов Н.Н., Копайгородский Е.М.; Линьков Е.М., Лихоманов В.А., Любимов В.С., Карулин Е., Карулина М., Курдюмов В.А., Литонов О.Е., Мансуров М.Н., Марченко А., Мацкевич Д.Г., Мирзоев Д.А., Назинцев Ю.Л., Недошвин О.А., Никитин В.А., Осипенко Н.М., Панов В.В., Петров И.Г.; Поломошнов А.М., Помников Е.Е., Рогачко С.И., Сазонов К.Е., Смирнов В.Н., Сериков М.И., Слесаренко Ю.Е., Сурков Г.А., Сухоруков К.К., Кузьмичев К.В., Тазов Д.Н., Трусков П.А., Уварова Т.Э., Фарафонова А.Э., Фокеев Н.В., Фролов А.Д., Хейсин Д.Е., Храпатый Н.Г., Цуприк В.Г., Цуриков В.Л., Черепанов Н.В., Швайштейн З.И., Шибакин С.И., Шульман А.Р., Шхинек К.Н., Якунин Л.П., а также некоторые другие.

Значительную роль в постановке исследований свойств морских льдов, организации таких работ на дрейфующих станциях, систематизации полученных данных и их публикации сыграл образовавшийся в 1920-х годах Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, накопивший ценнейший материал о ледовом режиме Северного Ледовитого океана и антарктических льдах. Главным координаторами по разработке Норм в области ледовых нагрузок на сооружения, включая исследования, были сотрудники ВНИИГ им. Веденеева.

Систематизированные данные о прочностных параметрах морского льда и основных схемах разрушения льда в этот период активно публиковались и в работах зарубежных исследователей: Айера С.Х., Ассура А., Бергдала Л., Бленкарна К.А., Брауна Д., Бутковича Т., Водри К., Вонга Я., Ву Х.С., Голда Л.В., Дикинса Д., Еранти Е., Забиланского Л.Ю., Кавасаки Т., Карна Т., Картера Д.С., Кросдэйла К.Р., Мазера К.Р., Мэтлока Х., Мишеля Б., Моргенштерна Н.Р., Накаямы Х., Невела Д.Е., Нуттала Дж. Б., Края П.Р., Керра

О.Д., Оджимы М., Озаки А., Пейтона Х.Р., Ральстона Т.Д., Саеки А., Сандерсона Т.Д.О., Синха Н.К., Содхи Д., Табата Т., Тейлора Т.Р., Тимко Д.В., Тоямы Ю., Уикса У., Фредеркинга Р., Хираямы К., Шварца И., Шульсона Е.М., Эдварвса Р.Ю., Энгельбректсона А., Ямашиты М. и многих других.

В этот же период 1970-80 г.г. появились и соответствующие «Рекомендации...», призванные унифицировать как процесс заготовки образцов и их размеры, так и правила проведения испытаний и описания результатов [95,405,406,], которые совершенствуются и до настоящего времени [335,416].

Многочисленными исследованиями было выявлено достаточно большое количество различных факторов, которые напрямую или косвенно оказывают влияние на получаемые при испытании образцов льда значения предела его временной прочности R_p (Рис. 1.4.2).



Рисунок 1.4.2 Таблица факторов, значимых для реальной прочности льда

Установлено, что морской лед – очень сложное физическое тело, представляющее собой гетерогенную (многокомпонентную) систему, элементами в которой являются кристаллы чистого льда; кристаллы различных солей; рассол (раствор солей в воде); поры воздуха, а также твердые или биогенные включения. Поэтому, несмотря на очень большое количество полученных данных по физико-механическим свойствам морского льда, проблема «*надёжности соответствия*» его прочностных характеристик, полученных при испытании образцов из него, виду и критическим значениям прочности в контактной зоне массива ледового поля все еще оставалась открытой.

Пространственно-временная изменчивость структуры и текстуры морского льда, его солености, пористости, температуры и зависящей от них прочности (Рис. 1.4.3)

значительно усложняет начальные условия для получения решения задачи исследования. Соотношения элементов в данной системе постоянно изменяется во времени как по толщине ледового покрова, так и по его площади простираения.

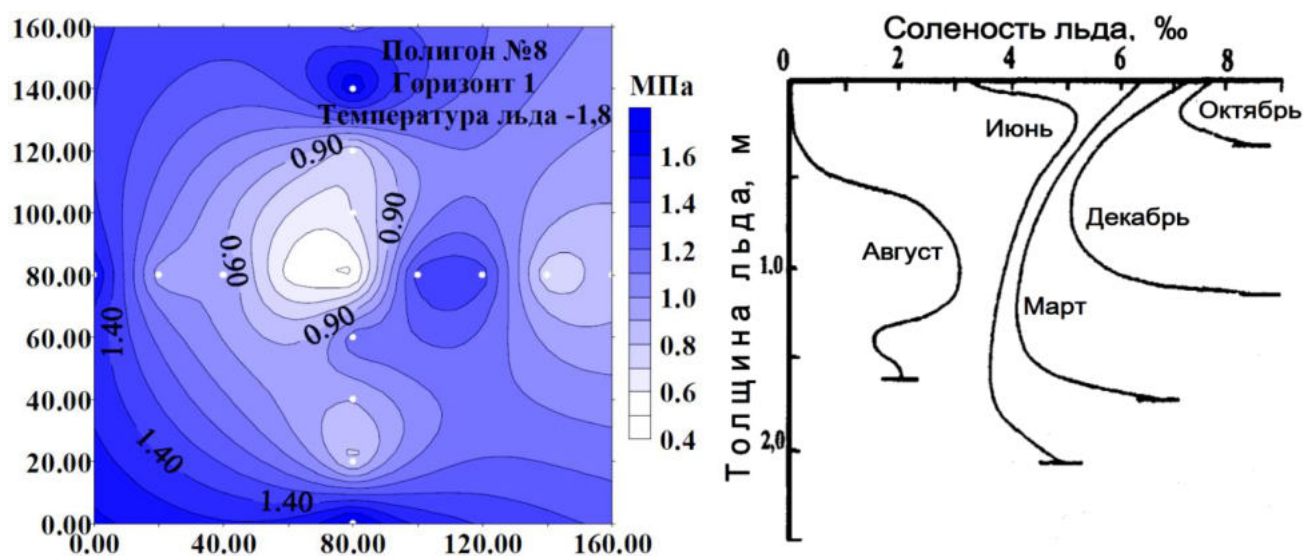


Рисунок 1.4.3 Данные исследований пространственно-временной изменчивости параметров морского льда: а) – прочности льда по площади ледового поля 160x160м² (по Фарафонову А.Э. [431]; б) – солёности льда по Мальмгрену Ф. [376]

Такие изменения связаны как с сезонным изменением температуры воздуха и миграцией солей к нижней поверхности льда, так и с оттепелями, дрейфом ледовых полей, их сжатием, разрушением и торошением. Эти процессы приводят к тому, что структура льда, а также соотношения элементов в его текстуре постоянно меняются.

1.4.2 Критика российской методологии расчета ледовой нагрузки по методу «непрерывного разрушения»

На протяжении достаточно длительного периода – с конца 60-х годов и по настоящее время большинство зарубежных исследователей считают разработанную советскими инженерами и учеными описанную выше методологию, утвержденную российскими нормативными документами, а ранее и ряда стран [3,22,40,309] и регламентирующую расчет нагрузки от воздействия ровного льда на опору сооружения («Уравнение Коржавина К.Н.» – 1.3.4) не достаточно полно и адекватно описывающую явление взаимодействия ЛП с МЛО. В этот период было проведено большое количество исследований для уточнения коэффициентов («факторов соответствия») k_i , m_j , m_e «формулы Коржавина» для морского льда, имеющего иную по сравнению с речным льдом структуру и текстуру, множественные поры и ячейки с рассолом, различное строение по толщине и анизотропию свойств по протяженности ледовых полей.

Популярность использования «советского» нормативного метода существенно уменьшилась (см., например, [95,126,181,250,419]), когда выяснилось, что

измеренная прочность на сжатие морского льда σ_0 во многом зависит от методов испытаний, качества подготовки образцов. Так, по мнению известных исследователей К. R. Croasdale с соавторами [31,32] «полезность уравнения Коржавина ограничена из-за необходимости ввода значения прочности на сжатие льда», хотя эти же авторы указывают, что уравнение Коржавина не единственное, для которого требуется это значение, которое должно включать масштабные, размерные, скоростные и другие факторы. Но эти и многие другие авторы таких публикаций в разные годы особенно отмечали неадекватность применяемого критерия прочности σ_0 не столько потому, что результаты достаточно трудоемкого и сложного процесса определения значений этого параметра в зимних полевых условиях [95,403,419] существенно зависят от условий испытаний малых образцов, но и потому, что этот параметр не является физическим критерием разрушения льда и использование его в прочностных расчетах носит условный характер.

На это в своем исследовании указывает, например, К. Kendall [126], известный теоретик и испытатель образцов материалов как их представительных объемов. Он выразил проблему так: «удельная работа разрушения образца льда на самом деле не является материальной константой, но зависит от испытательных технологий и подготовки образца к испытаниям».

В последней четверти прошлого века усилиями большого числа исследователей уже было сформировано понимание сути механических и физических процессов разрушения льда непосредственно в его контактной зоне перед внедряющейся в него поверхностью. Известные исследователи по механике льда Palmer A.C. с его многими соавторами в их коллективном труде «Разрушение и его роль в описании ледовых сил на шельфовых сооружениях» [182] однозначно показали необходимость понимания того, что «универсальная формула для определения ледовой нагрузки не может быть получена, также как не может быть универсальной формула для действия сил на различные тела в движущейся жидкости, и в нынешнем состоянии знаний было бы неразумно ожидать слишком многого». Также достаточно четко об этом написал в своей работе Шапиро Г.С., [47]: «описать деформирование льда с помощью одного закона, учитывающего все названные свойства, по-видимому, невозможно».

Кроме того, в тот же период у многих исследователей [192,225] уже сложилось достаточно четкое понимание того, что геометрические соотношения толщины льда, формы опоры и её размеров могут играть более значимую роль для понимания процесса формирования ледовой нагрузки и её максимального значения, нежели механические свойства льда. Имея эти сложности в виду, К. R. Maser ещё в 1971 году отмечал [157]: *«Имеющееся большое количество данных по прочности, полученных на малых образцах, пока мало*

применимы к крупномасштабным ледовым полям. Пока не будут лучше поняты результаты таких испытаний, их применение к инженерным проблемам не может быть реализовано».

Об этом же говорится и в опубликованной в 1978 году работе S.H. Iyer [151], где он, в частности, подчеркивает, что «механические свойства льда настолько сложны и изменчивы, что даже на аналитические методы нельзя полагаться, если они не подкреплены **полномасштабными измерениями и оценкой характеристик конструкций**, это говорит о необходимости исследований контактных давлений на реальных сооружениях, работающих в натурных условиях воздействия ледовых полей, но «...существует очень мало опубликованной информации экспериментальных данных, связанных с полномасштабными структурами. Все, что доступно, страдает от различных недостатков, и прямое применение этих данных для проектирования становится трудным. Поэтому **невозможно переоценить необходимость разработки надлежащих критериев проектирования**» [151].

Palmer и Croasdale [181], в частности, резюмируя многих исследователей достаточно критично высказались как по отдельным факторам, так и по методу в целом: «...Уравнение весьма привлекает своей простотой, но это неверно и глубоко вводит в заблуждение. Если формула была бы правильной, то давление на единицу площади контакта $p = P/Vh$ не зависело бы от площади контакта Vh , а зависело бы только от прочности на сжатие R_c и коэффициента вдавливания $\phi = (k_i + m_j)$, который, в лучшем случае, можно интерпретировать как фактор эмпирической подгонки и который может быть использован для приведения формулы (Коржавина – авт.) в соответствие с измеренными в натуре значениями нагрузки. ... В действительности, **сила на единицу площади контакта зависит от площади контакта**. В механике льда это обычно называют "эффектом размера" или "эффектом площади", впрочем, эффект такого рода следовало ожидать. Было бы удивительно, если бы этого не произошло. Доказательства эффекта размера получены в результате крупномасштабных экспериментов и из наблюдений за полномасштабными сооружениями. Сначала обсуждаются доказательства, а затем различные способы их включения в правила и формулы, которые может использовать конструктор».

Поэтому, в последние 3-4 десятилетия прошлого века и в начале 21 века на Западе активно проводились поиски иной модели для расчетов ледовой нагрузки на морские сооружения, которая не требовала бы больших материальных затрат на изыскания и давала приемлемые расчетные результаты.

Уже в 1978 году на 5-м международном симпозиуме по воздействию льда на морские сооружения в г. Лулео был опубликован ряд докладов, направленных на предложения **поиска нового критерия разрушения льда**. В частности, в докладе [246] было

опубликовано предложение автора *о возможности и необходимости использования энергетического критерия: удельной энергии механического разрушения льда ε_{cr}* , ранее опубликованное в СССР в работе [436] и еще неоднократно в [439,442,443,445] в разные годы. Позднее некоторые соображения по энергетическому подходу к решению проблемы были сделаны Ю.А. Долгополовым [327], D.S. Sodhi и C.E. Morris [222], A.T. Bekker [12], C. Daley [39].

Как отметил S.H. Yuen в его работе [151] «Таким образом, следует признать, что существующий критерий является менее чем удовлетворительным для разработки нетрадиционных структур в Арктике и необходима координация усилий по разработке руководящих принципов для нормирования воздействия льда на сооружения в канадских водах».

Позднее, как результат многолетних полунатурных исследований и натурных измерений ледовой нагрузки на реальные буровые платформы, в подтверждение приведенных выше заключений в качестве примера, следует привести выводы Вершинина С.А. Трускова П.А., и др., опубликованные в их работе [300]: «*Наибольшая нагрузка от воздействия льда на сооружения возникает при **дроблении** льда. Прочность льда на сжатие целесообразно определять как интегральную характеристику в условиях плоской деформации сжатия всего ледового поля*».

Учитывая показанные противоречия, для их изучения и исследования процессов разрушения льда на морских основаниях, были организованы несколько национальных программ в Канаде, России, США, Норвегии и Японии.

Но рассмотренный в предыдущем разделе *нормативный силовой подход* к определению ледовой нагрузки в Российской Федерации, к сожалению, никогда и никем *не “ревизовался” и не оспаривался*, возможно поэтому происходило накопление некоторых противоречий и трудностей решения этой задачи по существующей методике. Но *в методику расчета ледовой нагрузки в течение последних 50 лет кардинальных изменений не внесено*, обозначенные выше вопросы остаются. Кроме того, углубленное изучение этого сложного комплексного процесса приводит к выявлению влияния на его закономерности и параметры новых факторов и их сочетаний. Это порождает необходимость оценки уровней влияния еще большего количества параметров, влияющих на значения получаемой в результате расчета ледовой нагрузки на сооружение.

В то же время в последние полтора-два десятилетия многие исследователи экспериментально подтвердили, что *лед на контакте с сооружением разрушается послойно*. Но современные достижения механики разрушения в методологию расчета ледовой нагрузки на сооружения пока не внедряются, поскольку *недостаточно еще создано предпосылок для формирования инженерного метода решения задачи методами механики разрушения*.

Для разработки **расчетной модели ледовой нагрузки** необходимы детальные комплексные исследования **механизмов разрушения льда в массиве ледового поля** различной толщины в зоне его контакта с опорами сооружений различной формы, размеров и жесткости. Также следует найти, изучить и учесть **зависимости типов разрушения льда от его прочности и скорости воздействия** ледовых полей на опоры сооружений.

1.5 Нормирование определения ледовых нагрузок за рубежом

Идея определения ледовой нагрузки на основании нормирования значений контактного давления, достижение которых вызывает разрушение льда существует более 100 лет. Всегда базовым ее воплощением был метод расчета ледовой нагрузки, предложенный Комаровским А.Н. в 1932 г. [344] и доработанный и усовершенствованный Коржавиным К.Н. в 1938-1981 г.г. [351,352,353,356,355] (и получивший впоследствии его имя), который стал нормативным методом в СССР и ряде других стран [3,22,40]. Не полное соответствие этого метода задаче воздействия льда на морские сооружения в условиях зимних периодов и многолетнего льда было обнаружено и вызвало его критику зарубежными исследователями (см. раздел 1.4 этой главы), когда инженеры в конце 1960-х годов начали внимательно рассматривать проблему формирования ледовых нагрузок на проектируемые для строительства на шельфе Аляски буровые платформы для добычи нефти и газа.

Это было результатом резкого подъема интереса к добыче нефти в ледовитых морях Северной Америки со стороны нефтедобывающих компаний и правительств США и КАНАДЫ. Прецедентов было немного, поэтому вопрос о проектной нагрузке на конструкцию ледостойкого сооружения, льда стал основным в проблеме, требующей решения. Первая оффшорная структура – искусственно намытый остров на глубине 3 метра в канадском секторе моря Бофорта, была построена в 1972 г. К 1987 г. уже более глубоководные участки там же были пробурены с использованием донных конструкций кессонного типа на глубине до 32 м. А всего на канадском и американском арктическом шельфе в этот период было сооружено и успешно эксплуатировалось около 35 сооружений различной конструкции [206]. И в течение всего этого периода проводились очень интенсивные исследования не только слабо изученных строения морского льда и его физико-механических характеристик, но и по **поискам модели, адекватно описывающей механику процессов разрушения льда на контакте с опорой сооружения в условиях моря, поскольку переход от знания параметров разрушения льда при мелкомасштабных испытаниях к прогнозированию того, как лед ведет себя в больших масштабах, формируя ледовую нагрузку на сооружение, тоже отсутствовал.**

Параллельно с поисками новой расчетной модели, взамен российской «формулы Коржавина» для сооружений, активно проводились такие же работы и для судов [76,159,254]. В частности, с середины 1960-х годов такие исследования контактных «разрушающих» давлений и механизмов разрушения льда велись в Финляндии и в СССР параллельно с работами по воздействию льда на сооружения. В этот период резко возросло число лабораторных исследований, полунатурных и натурных измерений на построенных и строящихся сооружениях и судах с применением современных измерительных систем на основе тактильных и механических датчиков, тензометрических пленок, погружных домкратов и плоских силовых панелей, а также и программ для обработки баз данных.

Таким образом, не смотря на неудовлетворенность многими аспектами «метода Коржавина К.Н.», рекомендовавшегося до некоторого времени как российскими, так и некоторыми зарубежными нормами [354, 354, 354, 354] (вставить правильные!) для применения в расчетах ледовой нагрузки на опоры, и на очень высокую активность работ по данному направлению, мотивируемую резким расширением объемов проектирования и возведения разведочных и промысловых платформ для добычи углеводородов в Баренцевом море, море Бофорта, в заливе Кука на Аляске и в Бохайском заливе в Китае, на российском Сахалине, **основной целью большинства исследователей, работавших на промышленные корпорации в этот период, стало получение простого, но достаточно надежного инженерного метода расчета ледовой нагрузки, который при минимуме полевых изысканий давал бы достоверные результаты, согласующиеся с измеренными в реальных условиях значениями ледового давления на опоры шельфовых сооружений.**

1.5.1 Концепция «Р–А» – как эмпирическая модель определения ледовой нагрузки на сооружения

К концу 1987 г. были накоплены результаты исследований не только по прочности морских льдов при *испытании малых образцов* на одноосное сжатие (*а*), но также по *тестам среднего масштаба* по вдавливанию плит в грань ледового поля на всю его толщину (*б*), а также по воздействию льда на *реальные натурные сооружения* различной конструкции (*в*). Общим местом в полученных результатах их авторы всегда отмечали общую тенденцию для всех видов испытаний на сжатие льда и для всех масштабов опытов: «Чем меньше площадь контакта, тем больше давление».

В 1988 году Т.Д.О Sanderson [206] объединил по данным параметрам большое количество результатов опытов, выполненных разными авторами в разных масштабах и по-

строил единую зависимость «давление-Площадь», которая впоследствии стала **называться «Концепция Р-А²»** (Рис. 1.5.13). **Цель идеи** автора рассматриваемой работы – эмпирически вывести основную взаимосвязь предельных силовых параметров контакта лед-структура от реальной площади этого контакта через численные результаты испытаний. Для этого Т.Д.О Sanderson [206] использовал перечисленные ниже результаты испытаний, в которых проводилось «полнотолщинное» торцевое вдавливание и по которым имеется широкий диапазон данных для этого типа геометрии взаимодействия.

(А) Лабораторные (маломасштабные) испытания, как правило, выполнявшиеся на унифицированных образцах льда S-2 без пузырьков с осью, ориентированной в плоскости приложенной сжимающей силы. Данные поступают от Коржавин, 1962 [354]; Hirayama *et al.* [90,89] (1974), Frederking and Gold [58] (1973), Zabilansky *et al.* [271] (1975), Michel and Toussaint [168] (1977), Kry [139] (1979b), Michel and Blanchet [167] (1983), and Timco [101] (1986a).. Они охватывают широкий диапазон соотношения сторон D / h , от 0,21 до 83,0.

(Б) Среднемасштабные тесты. Как правило, это испытания жесткости торцевой грани естественного плавучего ледяного покрова по всей его толщине. К ним относятся различные «испытания на месте» льда первого года, например, испытания на установке “Щелкунчик” (Croasdale, 1970, 1971, [28,29]); испытания прочности крупных образцов (блоков) фирмы Eххон (Т.Д. Ralston, 1986, [193]); опыты Inoue and Koma (1985, [97]); испытания на пресноводном Озерном льду (Croasdale, 1971 [29]; Taylor, 1978 [232]; Miller *et al.*, 1974; Nakajima *et al.*, 1981, [172]); измерения на речных мостах-пирсах (Gerard, 1978, [74]); и данные давления морского льда на маяки (Määttänen, [150], 1981; Engelbrektson, 1988 [45]; другие); и взаимодействия с сооружениями в заливе Кука (Blenkarn, 1970 [20]).

(С) Полномасштабные эксперименты по давлению льда на искусственные основания и острова проводились как в море Бофорта (Metge, 1976; Стрельчук, 1977; Johnston и др. 1985 [104]; Роджерс и др., 1988; Gulf, 1986 и другие. В таблице 1.5.2 дан перечень построенных к началу 1988 г. морских буровых оснований разных типов. Кроме того – в сводных данных учтены результаты исследований давления ледовых полей на острова – данные первой и второй Hans Island программ (Danielewicz и Metge, 1981 [165] и 1982). Результаты 3-й программы (1988) Hans Island (Danielewicz and Cornett, 1984) на этот момент являлись собственностью и они будут добавлены к этому графику позднее, см. [160].

² Этим символом обозначена проекция площади контакта льда с опорой во всех источниках, в т.ч. ISO/FDIS 19906:2010(E) – [20]. Здесь и далее это обозначение оставлено в оригинале при сносках на «Концепцию Р-А»

Набор использованных T.J.O. Sanderson [206] для построения диаграммы (Рис.1.5.13) данных охватывает широкий спектр типов льда (пресноводный лед S-2, лед первого года и многолетний лед) и широкий спектр условий испытаний (лабораторные эксперименты, в т.ч. по вдавливанию; испытания на месте погружным и плоскими домкратами; взаимодействие с мостовыми опорами, маяками, морскими буровыми сооружениями и островами. Все взятые в построение кривой “Р–А” данные являются «сырыми» и никоим образом не корректировались.

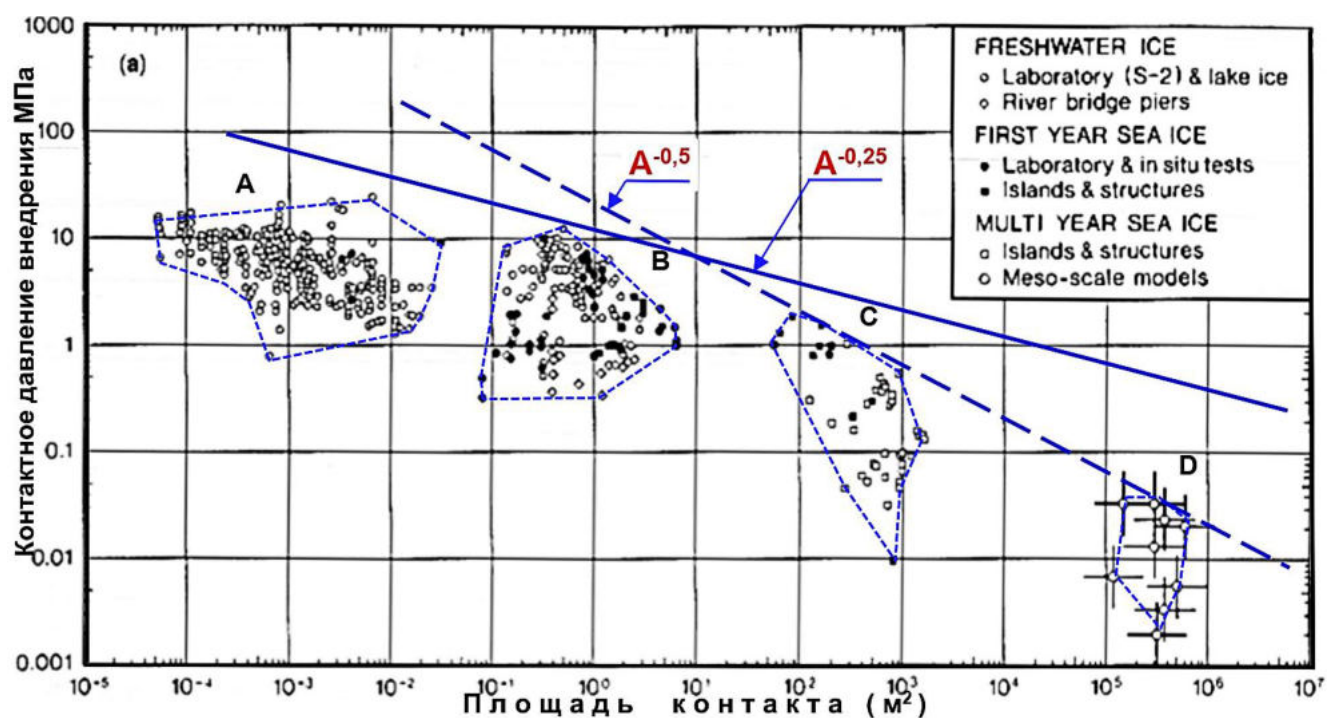


Рис. 1.5.13 Сводный график по T.J.O. Sanderson, [206] не нормализованных данных измерений давления льда на торцевую грань ледового покрова и в толще плиты льда по отношению к площади контакта, сгруппированных по масштабам опытов

Таблица 1.5.2

Таблица 1.5.2: Морские основания, инструментированные для измерения нагрузок от полей однолетнего льда (по D. Blanchet and S.J. DeFranco [19])

Место (место-рождение) проведения испытаний	Год	Тип сооружения, конструкции	Максимальная ширина конструкции (м)	Максимальная толщина ровного льда / тороса	Максимальная ширина тороса, стоящего на дне (м)	Методы измерения ледовой нагрузки
Остров Adams	1981-1985	Природный остров	200	2	-	Ровное поле льда

Amauligak	1988	Molikpaq – стальной кессон на грунтовом острове	105	12	2.5	-	Сооружение
Amerk	1985	(CRI) - Стальной кессон в основании острова Caisson-retained island	117	1.8	2.5	150	Сооружение и торос
Aurora	1988	Одиночный стальной кессон (Single Steel Drilling Caisson - SSDC/M)	162	1.6	2.8	270	Сооружение, ровное поле и торос
Залив Кука	1966-1976	Платформа ферменного типа на трубах	4	12	*		Опора платформы
Fireweed	1981	Одиночный стальной кессон (Single Steel Drilling Caisson - SSDC/M)	162	1.8	2.5	220	Ровное поле льда
Hondo	1976-1979	Опоры моста	23	1.1	-		Опоры моста
Kadluk	1984	(CRI) - Стальной кессон, в основании острова Caisson-retained island	117	1.8	-	160	Сооружение, ровное поле льда
Kaubvik	1987	(CRI) -Стальной кессон, в основании острова Caisson-retained island	117	1.6	2.7	205	Сооружение, ровное поле и торос льда
Kogyuk	1984	Одиночный стальной кессон (Single Steel Drilling Caisson - SSDC)	162	1.8	2.5	Площадка льда	Торос и ровное поле льда
Nanisivik	1986	Док	98	1.4	-	-	Док и ровное поле льда
Pembridge	1974	Опоры моста	0.9	0.5	-	-	Опоры моста
Phoenix	1987	Одиночный стальной кессон (Single Steel Drilling Caisson - SSDC/M)	162	1.8	2.6	340	Сооружение, ровное поле и торос
Tarsiut N-44	1982	Бетонный кессон на грунтовом острове (CRI)	110	1.8	2.5	250	Сооружение, ровное поле и торос льда
Tarsiut P-45	1983	Бетонный кессон на грунтовом острове (CRI)	110	1.7	2.5	240	Сооружение и торос
Uviluk	1983	Одиночный стальной кессон (Single Steel Drilling Caisson - SSDC)	162	1.7	2.6	Площадка на льду	Сооружение

Эффект снижения давления по мере увеличения размера или площади нагруженной области, согласно показанным результатам измерений (Iyer, 1983, [100]; T.J.O. Sanderson, 1988 [206]; Masterson и Frederking, 1993 [159]) обычно выражается в виде:

$$p = k \cdot A^n, \quad (1.5.1)$$

где: p = давление льда, A = площадь нагружения, k , n = константы, n меньше 1.

Для целей проектирования важна «верхняя огибающая» всех данных, и здесь T.J.O. Sanderson предложил 2 ее варианта, показанных сплошной и пунктирной линиями на Рис. 1.5.13. Позднее формула этого вида по рекомендациям Мастерсона и Фредеркинга [159] была принята для расчетов эффективных давлений разрушения льда на сооружениях в нормах API RP 2N/95 (США, [3]) и CAT/CSA-S471-92 (Канада, [22]), действовавших до 2010 г., где она дается в виде:

$$p = 8,1 A^{-0,5} \quad (1.5.2)$$

Вид этого графика льда приведен на Рис. 1.5.14 с линиями, которые показывают рекомендуемые области назначения разрушающих давлений.

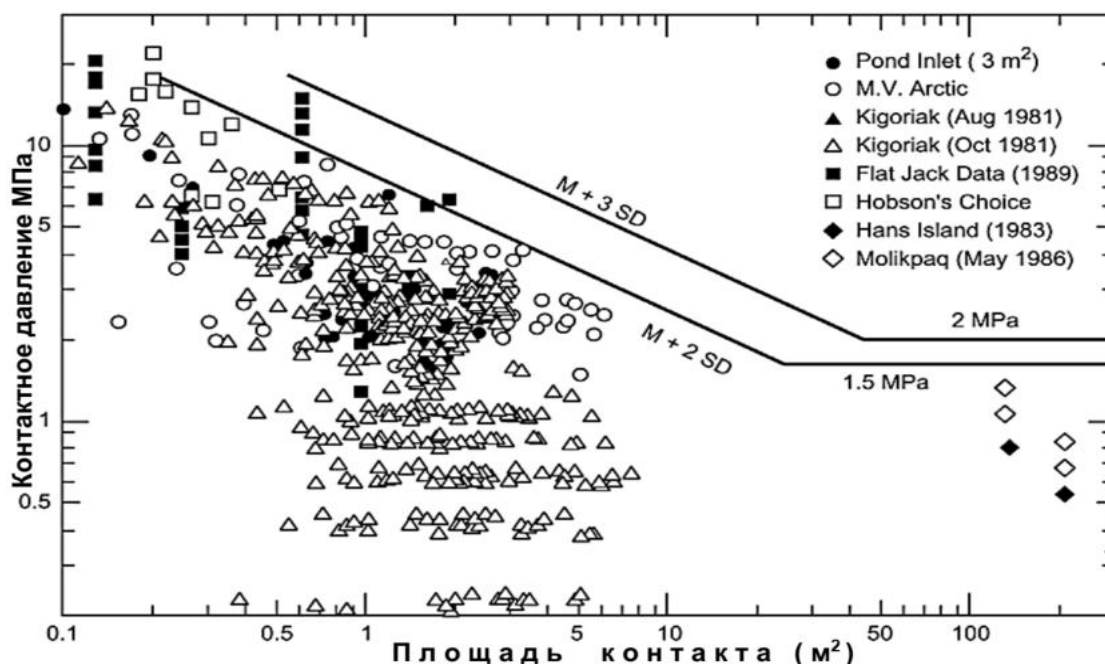


Рис. 1.5.14 Зоны рекомендуемых для проектирования МЛО областей соотношений эффективных давлений разрушения льда к номинальной площади контакта в Нормах

Две линии на Рис. 1.5.14, обозначенные как M+2SD и M+3SD, обозначают трендовые линии среднего значения (M - middle) плюс два и три стандартных отклонения (SD) данных, соответственно. Они описываются формулами:

M+2SD(МПа):

$$P = 8,1 A^{-0,5} \text{ при } 0,1 \text{ м}^2 < A < 29 \text{ м}^2; \text{ и } P = 1,5 \text{ для } A > 29 \text{ м}^2, \quad (1.5.3)$$

M+3SD(МПа):

$$P = 13 A^{-0,5} \text{ при } 0,1 \text{ м}^2 < A < 42 \text{ м}^2 \text{ и } P = 2 \text{ для } A > 42 \text{ м}^2. \quad (1.5.4)$$

1.5.2 Международные Нормы ледовой нагрузки на МЛО – ISO/FDIS 19906

Приведенные на рисунках 1.5.13 данные не являются полными на момент составления Р–А графика его автором 206], поскольку большая часть выполненных к тому времени результатов исследований в США, Канаде, Финляндии и Норвегии в тот период, как собственность нефтяных компаний – заказчиков таких исследований, были недоступны. Частично это касается и Рис. 1.5.14 по данным по платформе Моликпак и некоторым другим, подробные данные о работе которых во льдах показаны в работах Timco и Johnson 2002 и 2005 г.г. [240,242].

В 2007 г. по результатам анализа новых данных с шельфовых сооружений, полунатурных и лабораторных исследований, полученных за период после 1988 г. [14,25,34,36,37,54,61,111,112,113,115,116,119,127,151,170,249,262,275], **концепция Р-А** была подвергнута некоторой ревизии. Это было связано с тем, что большая часть данных, использованных Т.Д.О. Sanderson [206] для построения первичной диаграммы **Р-А** (Рис. 1.5.13), были получены из разно- масштабных опытов на многолетнем паковом льду, который есть только в море Бофорта, поэтому кривую необходимо было адаптировать к менее жесткому климату для однолетних арктических льдов (Masterson и др. [160,183]).

При адаптации кривой зависимости давления от площади к новым требованиям, предъявляемым к применению в других кодексах и практике, были убраны данные по испытаниям судов на удар, как слишком сложные и консервативные. Кроме того, были получены ранее не доступные данные по Моликпак и другим проектам, показавшие хорошее согласие с уже имеющейся базой данных.

Кривая давление-площадь и формулы соотношения «Р-А» были обновлены с отражением новых данных, они вошли в Международный стандарт «*International Standard ISO/FDIS 19906:2010(E). Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures*» [98], принятый к руководству в т.ч. и в России. Нормативные соотношения «Р-А» показаны синим цветом на Рис. 1.5.15.

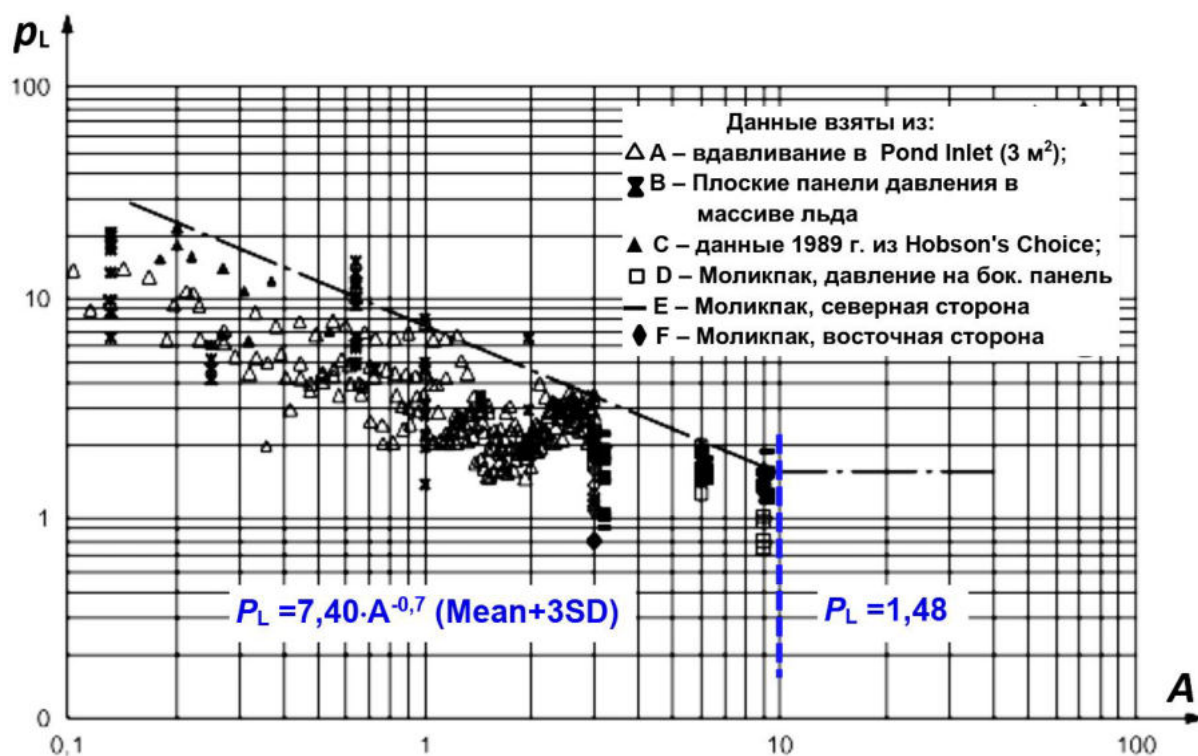


Рис. 1.5.15 Рекомендуемый международным стандартом ISO/FDIS 19906:2010(E) [98] график «P–A» для расчета ледовой нагрузки на морские сооружения

Таким образом, эта **концепция *P-A*** – как **основа для расчета ледового давления** на различные конструкции была принята международным инженерным сообществом (Рис. 1.5.15). Однако, в разных странах вводятся некоторые уточнения формул вида (1.5.3) – см. таблицу Приложении № 6. Они никаким образом не связаны с механикой процесса взаимодействия льда с сооружением, механикой разрушения торцевой грани ледового поля или физико-механическими характеристиками льда. В той или иной степени предпочтение отдается тем или иным экспериментальным данным, которые по мнениям экспертов наиболее подходят для условий конкретной страны или к соответствующей области задач.

В качестве некоего итога рассмотрения реально существующего и рекомендуемого сегодня Международным стандартом метода расчета ледовой нагрузки на морские сооружения можно процитировать двух известных ученых-ледотехников: K.R. Croasdale из его Предисловия к книге T.J.O. Sanderson «Механика льда – риски морских сооружений» [206]: «Проблема прогнозирования ледовых сил, воздействующих на сооружения, по – существу сводится к тому, что на первый взгляд кажется относительно простым, а именно к пониманию того, как лед деформируется и разрушается под нагрузкой. Эта кажущаяся простота оказывается парадоксом, во-первых, из-за сложной природы льда, а во-вторых, из-за многих способов, которыми он может разрушиться при воздействии на сооружения различной формы». Сам же автор «Механики льда...» [206] T.J.O. Sanderson во Введении к книге пишет: «Как ясно подчеркивается в этой книге, справедливо сказать,

что даже сейчас, несмотря на обширные исследования, у нас еще нет общепринятых и надежных методов прогнозирования ледовых нагрузок на сооружения. ...Центральным вопросом, рассматриваемым в этой книге, является вопрос о проектной нагрузке от льда на конструкцию. Ответ является комплексным и предполагает комплексное изучение нескольких предметов, в частности: ледовой обстановки, механики льда и анализа рисков. Статистика ледовых условий относительно проста; в наборе данных все еще имеются пробелы, но они быстро заполняются. Анализ рисков, сама по себе довольно молодая наука, но это также довольно просто и стало особенно легко применять, так как вычислительные средства Монте-Карло стали легко доступны. **Механика льда, однако, остается сложной и неполной наукой».**

1.6 Сравнение действующих российских и зарубежных Норм расчета ледовых нагрузок на отдельно стоящие морские сооружения

Вопрос о сравнении адекватности и «работоудобности» Норм расчета ледовых нагрузок на шельфовые сооружения всегда был актуальным для проектировщиков, если учесть, что ошибка в сторону занижения нагрузки может привести к катастрофе из-за разрушения несущих элементов основания платформы, имеющей колоссальную стоимость, а чрезмерное завышение – к соответствующему неоправданному удорожанию проекта. То есть, решение о величине ледовой нагрузки должно быть получено из технико-экономического обоснования, базовым критерием которого является относительный показатель стоимости сооружения к его сроку службы (Рис. 1.5.X). Безусловно, проектировщик обязан произвести расчет в полном соответствии с формулой (моделью) рекомендуемой утвержденными компетентным органом Нормами.

По сложившейся практике в СССР и РФ этот орган – государственный, то же и в большинстве других стран. НО, учитывая относительно немногочисленные пока реализованные проекты МЛО, а также долгий период сохранения конфиденциальности находящихся в частной собственности как проектной расчетной ледовой нагрузки, так и фактических измеренных на конструкции ее значений, сравнительный анализ Норм очень важен. Исходя из специфических требований к созданию «отраслевых» технических объектов, подвергающихся воздействию льда, отдельные государственные ведомства или частные корпорации создают собственные «Ведомственные (корпоративные) Нормы Рекомендации или Указания по проектированию ... объектов», которые по-замыслу должны повышать адекватность общегосударственных Норм в отрасли (корпорации). Поэтому в тематической литературе на эту тему периодически публикуются данные исследований, которые на данное время уже можно классифицировать по ряду подходов, реализованных в таких работах.

Надо отметить, что интерес к поискам «правильного метода расчета» ледовых сил» на сооружения совпадает с возрастанием роста запросов нефтяных компаний к разработкам новых месторождений в холодных регионах. Чаше других в таких сравнениях, выполняющихся для одних и тех же «базовых» исходных данных, анализируются абсолютные значения рассчитанных по сравниваемым Нормам ледовой нагрузки, реже – удобство получения и доступность дополнительных параметров для расчетов и т.д.

Этой важной теме, как *индикатору направления дальнейших исследований по совершенствованию метода расчета ледовой нагрузки*, посвящено достаточно много работ [278,55,56,151,174,176,205,214,237,324,373,340,428]. Но, следует заметить, что некоторые из них выполнялись по инициативе исследователя [55,176,205,324,373], другие же делались методом экспертных оценок [278,56,151,176,214,237,340,428], когда международные эксперты «решали» задачу с одними и теми же исходными данными, то есть проектное задание по расчету ледовой нагрузки с использованием конкретного нормативного документа. В качестве экспертов выступали как известные исследователи [278,56,151,176,214,237], так и простые инженеры различной квалификации [324,373,340,428].

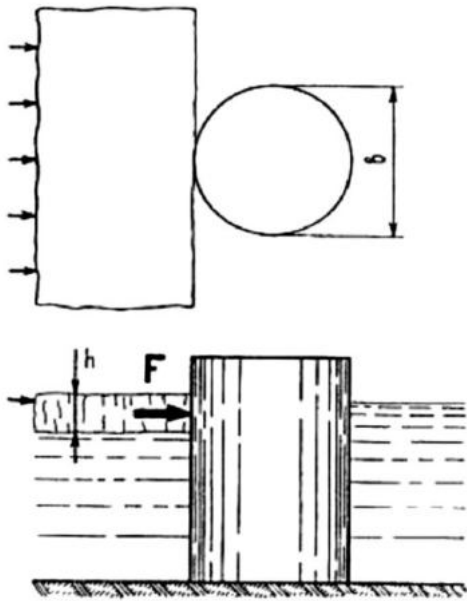


Рис. 1.6.1 Схема приложения нагрузки от ледяного поля на вертикальную опору по [420]:

F – сила воздействия;
 h – толщина льда;
 b – ширина опоры

четах отношения D/h ; мало указаний дается для *статистической изменчивости прочности льда*, скорость движения льдин и др. параметров, напрямую влияющих на изменения контактных сил, вызывающих колебания сооружений».

Как правило, подавляющее большинство таких сравнительных анализов в качестве резюме декларировали отчеты о *больших расхождениях в результатах расчетов ледовой нагрузки для одинаковых сценариев*, посчитанных по различным нормативным документам, некоторые из результатов таких расчетов или «опросов» приведены ниже.

Одним из первых, еще в 1976 г. подробный и тщательный обзор Норм нескольких стран, включая и СНиП (СССР) выполнил С.Р. Neil [174], по результатам которого он отметил, что: «в полученных с помощью различных кодексов и методов проектирования для идентичных ситуаций *силах давления льда отмечается значительное неравенство*; ни один из документов не имеет прямого использования в рас-

В 1978 году S.H. Iyer [151] опубликовал свой сравнительный анализ результатов расчетов по Нормам различных стран. Он получил расчеты силы давления льда с толщиной 0,6 и 1,1 м на опору $D=2$ м по СН 76-59 [418], по нормам Канады CS-S6.74 и CSA-S471 [22] и «таким же» шведско-финским Нормам. В его выводе обозначено, что *«существующие критерии являются менее чем удовлетворительными для разработки нетрадиционных структур в Арктике»* [151]. И в числе 8 рекомендаций компании FENCO по совершенствованию методов расчета ледовой нагрузки он предложил рассмотреть *«энергетическую концепцию» (энергию, затрачиваемую на разрушение льда)³, как альтернативу силовому подходу.*

После создания американо-канадского нормативного документа ISO 19906 количество работ по сравнительным расчетам ледовой нагрузки с новой методикой, основанной на концепции «Р-А» увеличилось. Поскольку эти Нормы требовали корректировки после тщательного анализа и тестовых расчетов, сверок их результатов с измеренными нагрузками на сооружениях и пр. Такие предложения были даны в работах [160,183], которые были учтены впоследствии.

За последние три десятилетия специалистами, участвующими в разработках нормативных документов *проводилось три аналитических опроса*, в них международным экспертам и компаниям было предлагалось сделать свои оценки значений ледовых нагрузок для одинаковых исходных данных. Первичный опрос был организован Sanderson T. J. O., 1986 [205], а два других – Shkhinek K.N. с соавторами, 1994 [214] и Croasdale K., 1997 [278]. В каждом из опросов были показаны данные о существенных различиях в прогнозе ледовой нагрузки, а также отмечено, что существенный разброс в определениях значений ледовой нагрузки экспертами из различных стран и компаний возникает, как правило, из-за использования различных сценариев при расчетах, применяемых для определения нагрузок эмпирических формул, таких как: **прочность льда; вида взаимодействия; тип ледовых образований** и т. д. Как отмечается в Монографии международной группы авторов [214]: *«Несмотря на 10-летний интервал между опросами, разброс оценок по-прежнему составлял 10—15 раз. Особо важно, что оценки, основанные на трактовке данных крупномасштабных измерений нагрузки на функционирующие сооружения в одном и том же регионе, отличаются в 2,5 раза по данным опроса, проведенного как Шхинеком и др., так и Кросдейлом».*

Четвертое обширное исследование по сравнительным расчетам ледовой нагрузки *еще через 10 лет* после Croasdale K., 1997 [278] было сделано Timco G.W. и Croasdale

³ В этом же сборнике трудов конференции была опубликована коллективная статья советских исследователей, где такой подход уже был представлен автором данной работы [Ошибка! Закладка не определена.] экспериментальным обоснованием и примером

К.Р. [237] в 2006 г. В исследовании приняли участие двадцать один эксперт, анализ работы которых дал возможность сделать вывод о снижении отклонений от средних значений в расчетах ледовой нагрузки на **вертикальную опору** от воздействия однолетнего льда (Рис. 1.6.2,а). Исследователи [237] это объяснили просто: «Это улучшение объясняется новыми полномасштабными данными, ставшими общедоступными⁴».

Второй график на Рис. 1.6.2,б говорит о том, эксперты в последние годы уже предпочитают работать с измеренными в натуре данными, используя их в аналитических расчетах. Это говорит о том, что недоверие к рекомендациям Стандартов растет ввиду **ненадежности определения критерия разрушения льда – предела прочности определяемого испытаниями малых образцов**.

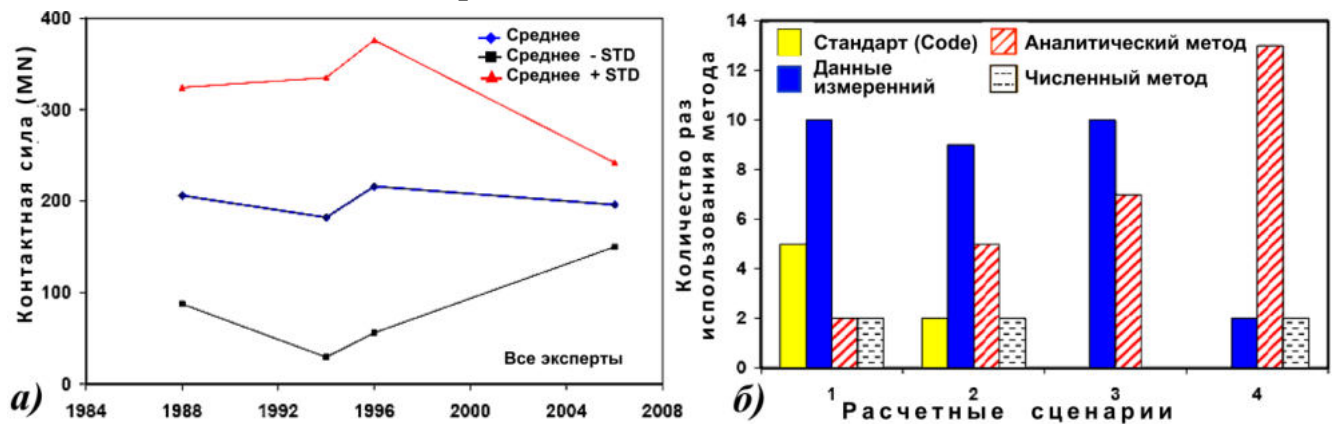


Рис. 1.6.2 Сравнение прогнозов расчетных нагрузок от взаимодействующего ледяного покрова первого года с **вертикальным сооружением**

Более конкретно об отмеченных отклонениях в результатах сравнительных расчетов значений ледовой нагрузки для **одних и тех же сооружений и параметров льда**, неоднократно проводившиеся специалистами [278,151,176,214,237,235, 428] в полном соответствии с нормативным требованиям различных стран даже с учетом постоянного совершенствования нормативного метода согласно различного рода “Рекомендаций... Указаний” [95,303,335,367,422,430] всегда показывают большие расхождения в результатах. Такие расхождения говорят не только о несовершенстве метода расчета, но, в большей степени **о несоответствии метода испытания образцов натурного льда расчетной схеме задачи** контактного взаимодействия торцевой грани ледового поля с поверхностью опоры сооружения.

Так, например, анализ «адекватности» отечественных нормативных документов по расчетам ледовой нагрузки на шельфовые сооружения для добычи газа

⁴ Данные по измерениям ледового воздействия на сооружения в море Бофорта, являясь собственностью заказчиков исследований – нефтегазовых компаний были конфиденциальными в течение более 15 лет (авт.)

[303,367,419,422] в сравнении с рекомендациями международного стандарта ISO 19906:2010(E) [98], выполненный в 2013 году Громовой [324] показал значительные расхождения результатов, полученных из расчетов по различным российским нормативным документам (Табл. 1.6.1) – до 3-х раз.

Таблица 1.6.1

Таблица. 1.6.1 Результаты расчетов нагрузки от ровных ледяных полей на цилиндрический опорный блок различных нормативных документов при одинаковых исходных условиях – по [324]

Наименование нормативного документа	Формула	Расчетная ледовая нагрузка, МН		Пре- выше- ние
		Сред- няя	Макси- мальная	
Методические указания по определению ледовых нагрузок на опоры мостов.	$F_{cm} = m \cdot R_b \cdot b \cdot h_{лр} \%$	50,37	84,72	1,8
СНиП 2.06.04-82*, 1995 г. «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)».	$F_{b,p} = m \cdot R_b \cdot b \cdot h_d$	73,64	121,35	2,6
ВСН 41.88 «Проектирование морских ледостойких стационарных платформ».	$F_{b,p} = m_1 \cdot K_b \cdot R_c \cdot b \cdot h_d$	71,15	143,82	3,1
СТО Газпром 2-3.7-29-2005 «Методика расчета ледовых нагрузок на ледостойкую стационарную платформу»	$F_l = m \cdot k \cdot R_c \cdot D \cdot h_d;$ $(F_w = p_{eff} \cdot D \cdot h_d)$	43,37 (58,13)	72,58 (88,13)	1,9
ISO 19906:2010 «Нефтяная и газовая промышленность – арктические морские сооружения».	$F_G = p_G \cdot h \cdot w$	32,62	46,65	1,0

Следует специально отметить, что с целью снижения различий результатов сравнительных расчетов значений ледовой нагрузки для одних и тех же сооружений и параметров льда, в СССР были изданы специальные «Рекомендации ...» по **методике испытаний физико-механических свойств льда** [405,406]. Позднее международное сообщество исследователей и инженеров-ледотехников создало рабочую группу для разработки единого метода испытаний образцов льда, которая в 1984 году представила на международном симпозиуме по механике льда согласованные «Рекомендации по методу тестирования образцов льда», которые были приняты в качестве международного стандарта [95]. С учетом всего накопленного опыта, охватывающего и опыт измерений ледовых сил на реальных сооружениях и современные методы тестирования параметров льда в его массиве в 2011 г. Арктический и Антарктический институт (ААНИИ) выпустил обширное

тематическое «Методическое пособие ...» [416], с той же целью унификации методов и технологий испытаний льда, в т.ч. его прочности.

Наиболее наглядно демонстрируют различия не только в численных значениях ледовых нагрузок, рассчитываемых по Нормам разных стран, результаты двух, наверное, последних к этому времени, объемных работ по данной теме 2012 г. [55] в 2012 г. и [340] в 2013 г. В первой из этих работ ее автор приводит разницу в методах уже на первом этапе расчетов – выборе расчетного значения предела прочности, как критериальной величины, определяющей наступление предельного состояния (подразумеваемого разрушения?). Эти данные приведены в таблице 1.6.2.

Таблица 1.6.2

Таблица 1.6.2 Значения прочности льда (в МПа), используемые в глобальных расчетах давления льда по [55]

Нормы (Стандарт), страна	ISO 19906 (Канада)	CSA S471 (Канада)	CSA S6 (Канада)	API PR 2N (США)	SNiP 2.06.04 (Россия)
Прочность льда на сжатие малых образцов	$C_R = 2.8$	$C_p = 8.5,$ $C'_p = 1.5$	$p = 1.5$	$C_p = 8.1$	$R_c = 4$

Как можно видеть из данных таблицы 1.6.2, **расчетные значения прочности льда**, применяемые в расчетах по различным методам, но в основе которых лежит предел прочности льда определяемый сжатием малых образцов, **отличаются уже на начальном этапе в 2,5-3 раза**.

В этом же исследовании [55] можно видеть и разницу в используемых концептуальных подходах к рассмотрению геометрических соотношений в механике взаимодействия опоры сооружения со льдом: для сценариев, когда соотношение $0,5 \leq D/h \leq 2 \div 5$ «работает формула Коржавина», но значения сил, полученные для этого диапазона D/h по российским Нормам (СНиП, СП) более, чем в 4 раза превышают такие же данные, полученные по «западным Нормам» (Рис. 1.6.3, а) и б)).

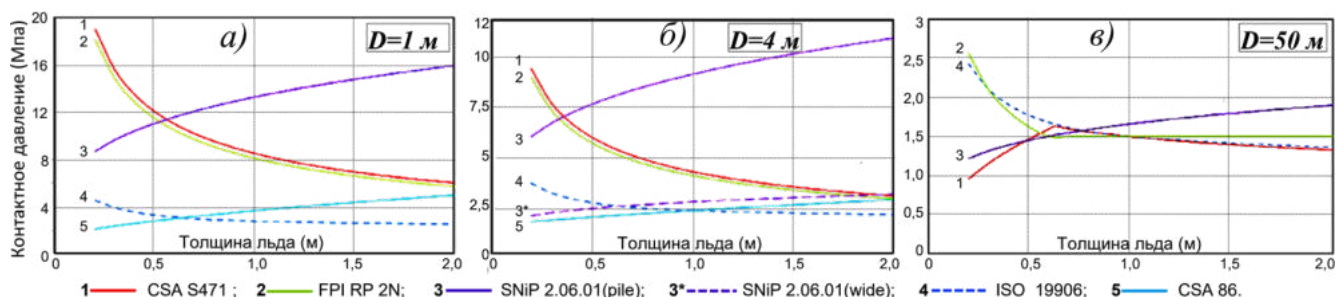


Рис. 1.6.3 Различия расчетных концепций, заложенных в нормативные методы разных стран на примере результатов, полученных в [55] для трех размеров **вертикальных опор**, воспринимающих давление однолетнего ледового поля

Менее значительный разрыв показывают графики ледовой нагрузки при $D/h > 10$, здесь все Нормы фактически реализуют концепцию «Р–А», где боковое стеснение на предельную прочность льда не оказывает существенного влияния.

Итак, рассмотрение всех данных, представленных в большинстве известных аналитических работ, описывающих результаты сравнения различных методов расчета ледовых нагрузок на **вертикальные опоры** морских сооружений и выполнявшихся в разные периоды, дает основания для некоторых выводов.

1. Сравнительные расчеты, выполненные по нормативным документам разных стран и по ISO/FDIS 19906:2010(E) для идентичных условий и исходных данных, дают значения ледовой нагрузки, **отличающиеся в несколько раз (по некоторым данным – до 10 раз).**

2. Все используемые расчетные методы построены на эмпирическом силовом подходе, не базирующемся на фундаментальных законах механики разрушения льда и .

3. Разрушение льда трактуется как дискретное событие, а не как **процесс достижения во времени его предельного напряженно-деформированного состояния** как деформируемого твердого тела в соответствии с постулатами теории упругости. **Количественно описание процесса разрушения льда во времени не является основой рассмотренных методов определения ледовой нагрузки**, поэтому такие методы не могут привести к пониманию явления циклического разрушения льда и, соответственно, к **модели циклической ледовой нагрузки.**

В то же время, *повышение эффективности расчетных моделей ледовой нагрузки, рекомендуемых действующими нормативными документами за счет введения в них других параметров, с учетом трудно определяемого взаимного влияния всех факторов, которые необходимо было бы учитывать в динамической расчетной модели ледовой нагрузки не очевидно.*

Решение проблемы необходимо искать через рассмотрение изменений энергетического баланса системы лед-сооружение в контактной зоне с выделением части энергии, затрачиваемой на разрушение льда, как альтернативу силовому подходу.

1.7 Циклическое действие льда — причина колебаний и разрушений морских сооружений

Процессу **формирования ледовой нагрузки во времени** серьезное внимание стали уделять после регистрации фактов значительных и опасных для сооружений и персонала амплитуд колебаний и опасной для промышленного оборудования вибрации при эксплуатации платформ в заливе Кука, морских маяков в Ботническом заливе, буровых вышек в Каспийском и Азовском морях и в Бохайском заливе, при строительстве ледостойких оснований на Сахалине.

Первыми исследователями, которые начали изучать эту проблему, были Peyton [190] и Blenkarn [20], исследовавшие эти явления на реальных морских основаниях платформ свайного типа в заливе Кука (Рисунок 1.6.1).

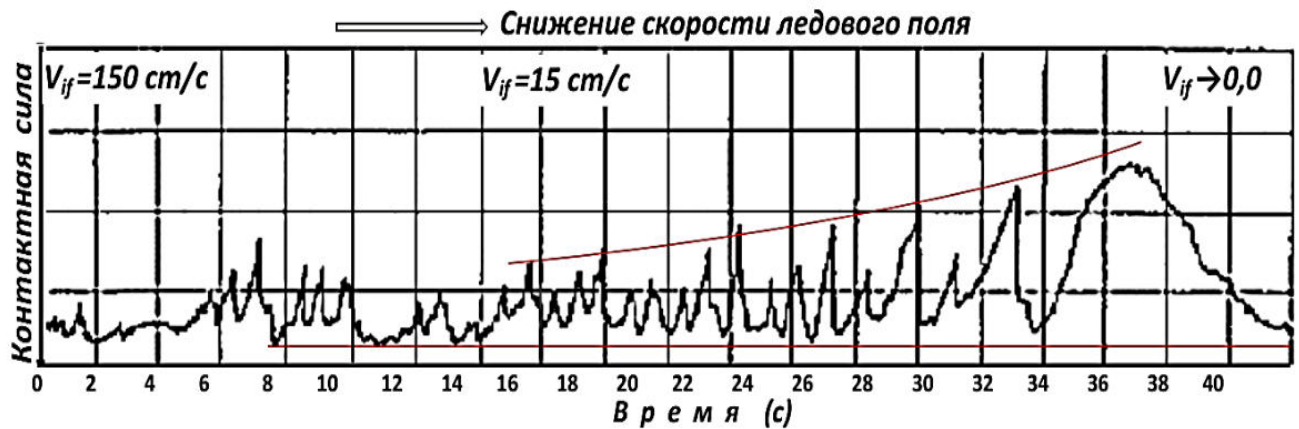


Рисунок 1.7.1 Запись «пилообразной» нагрузки от разрушения льда на опору экспериментальной платформы, в заливе Кука – по Н.Р. Peyton [190]

Несмотря на то, что от первых публикаций об этом феномене до сегодняшнего дня выполнено большое количество как теоретических, так и экспериментальных исследований на протяжении пятидесятилетнего периода, некоторые авторы отмечают, что *многие детали процесса взаимодействия сооружения со льдом, которые приводят к возникновению вибрации, пока еще не только не разработаны до уровня их учета в проектной практике, но и требуют продолжения их исследований.*

В этот же период времени были получены записи «пилообразной» ледовой нагрузки на элементы водопропускных сооружений на плотинах [351] (Рис. 1.7.2), а также на опоры железнодорожных и автомобильных мостов [173, 208, 192].

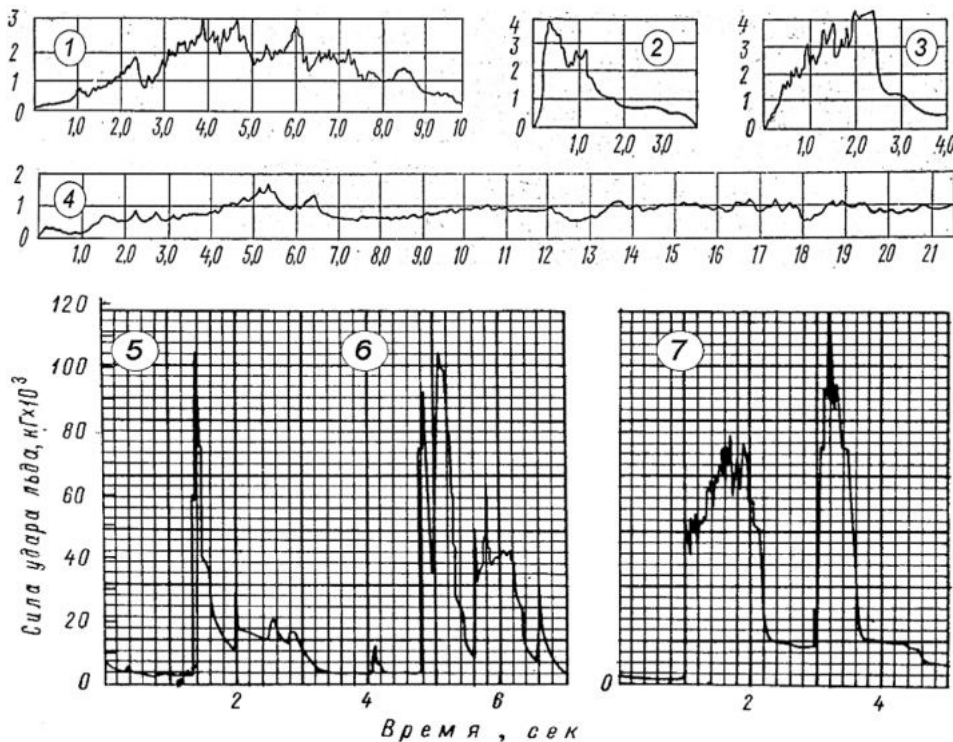


Рисунок 1.7.2 Запись ледовой нагрузки при разрушении льда на бычке низконапорной плотины в Сибири по В.А. Коренькову [192,351] и на опорах моста в Канаде по Neill G.R. [377]

Также в этот же период активно проводились исследования вибрации морских маяков в Ботническом заливе [43, 45, 147, 148]. Причиной такой активности стало строительство маяков и навигационных знаков для обеспечения развивающегося после второй мировой войны судоходства на Балтике с учетом увеличившейся осадки торговых судов. Толчком послужил факт разрушения в 1966 г. одного из стационарных маяков. Был сдвинут и разрушен дрейфующим льдом толщиной льда 0,3 – 0,5 м финский маяк *Tainio* [15] вблизи Хельсинки: кессон маяка с диаметром основания 16 м и диаметром башни 2,5 м на глубине 8 метров был сдвинут по несвязному грунту на 14 м и опрокинулся, когда основание уперлось в скальный выступ. В 1969 году под действием дрейфующих ледовых полей [15] также был разрушен шведский маяк *Nygran* аналогичных размеров (Рисунок 1.7.3). Башня маяка диаметром 2,5 м была разрушена на глубине 1 м ниже уровня моря, но основание маяка не было сдвинуто. В 1974 г. произошло разрушение нового финского маяка *Kemi I* в верхней части в результате сильной вибрации. В этот же период и также от действия «ледовой вибрации» был разрушен и маяк *Kemi II* [147, 148]. В 1977-79 годах на шельфе Азовского моря от натиска льда строящееся железобетонное основание буровой платформы в виде многогранника диаметром 8 м [277] получило повреждение (Рисунок 1.7.4).

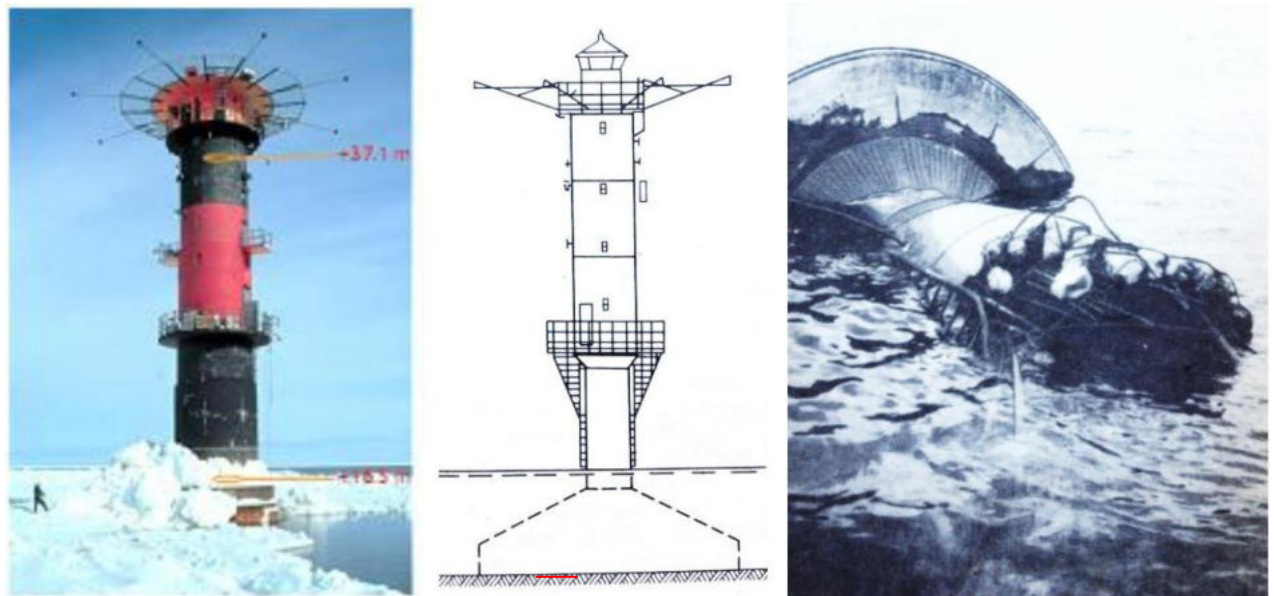


Рисунок 1.7.3 Общий вид, конструкция, и фото разрушенного маяка *Nygran*

Известны и другие случаи разрушения морских маяков на малых глубинах, в т. ч. - основания маяка ВМФ СССР на банке «Таллинна-Мадал» на глубине 10 м в створе Таллин-Хельсинки, сдвинутого и разрушенного льдами в марте 1961 г.



Рисунок 1.7.4 Наклон основания платформы для добычи газа в Азовском море по [277]

стальные стойки и раскосы ферм, что создало условия для повышения амплитуд упругого отклонения конструкции основания платформы.

Исследования показали, что одной из важнейших характеристик реакций платформ на динамические воздействия служит интегральное перемещение выбранной точки. Перемещение характеризует не только динамические свойства платформы, но также особенности ее взаимодействия со льдом [365]. Такое взаимодействие с пульсирующей нагрузкой со временем не только создает условия для повышения амплитуд упругого отклонения конструкции основания платформы и появления резонанса и усталостного разрушения элементов платформы. Но, кроме того, при этом создаются недопустимые условия жизнедеятельности обслуживающего персонала платформы [145].

Следует отметить, что динамическое взаимодействие льда и морских сооружений оказалось характерным не только для случаев оснований маяков кессонной конструкции основания и гибких конструкций с небольшими поперечными размерами конструкций опорных частей, обладающими явными динамическими характеристиками. Зимой 1985 – 1986 гг. платформа Molikrao, имеющая кессон массой в 54 000 т и габариты 111×111 м² в основании и установленная в море Бофорта (Рисунок 1.7.6-а), подвергалась многократным воздействиям дрейфующих полей многолетнего льда [101, 243, 365].

Разрушение стальной нефтедобывающей платформы в Бохайском заливе в 1977 г. от усталостных напряжений, возникавших от циклической ледовой нагрузки, заставило ученых и проектировщиков не только в Китае срочно заняться изучением этой проблемы на самом серьезном уровне [92,94,263,267,269, 365] с привлечением ведущих Европейских и Канадских исследователей – ледотехников. Конкретный анализ динамического воздействия ледовых полей на платформы сквозного типа показал, что от усталостных напряжений, возникающих при циклической ледовой нагрузке, были разрушены

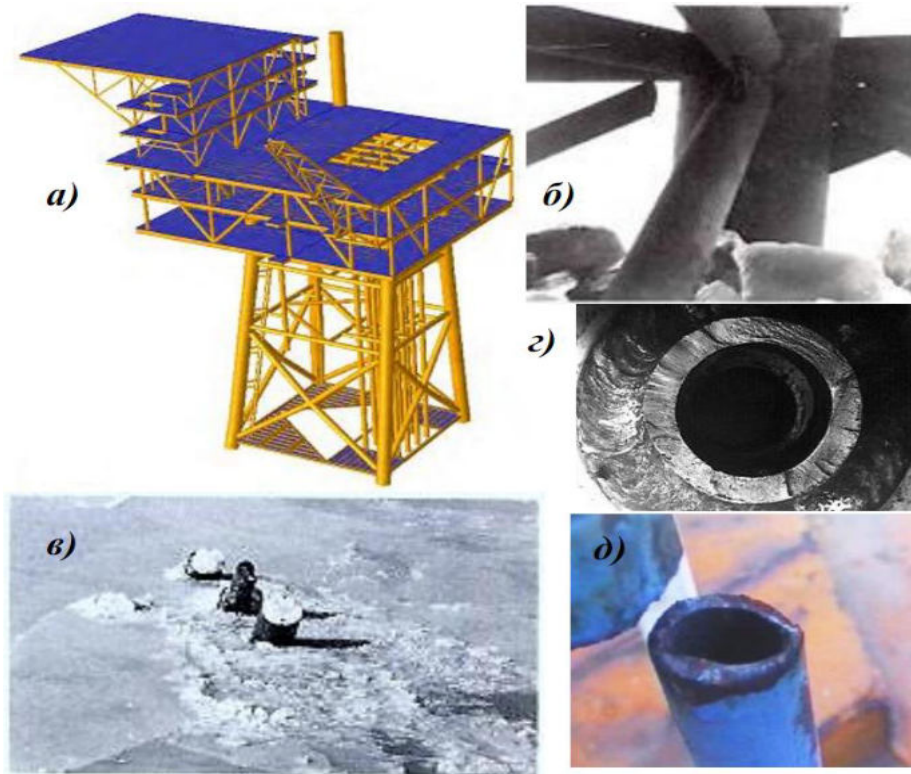


Рисунок 1.7.5 Разрушение стоек нефтедобывающих платформ ферменного типа (а) в Бохайском заливе по [92] и [377]: (б) – в 1969 г.; (в) – в 1977 г.; (г, д) – в 2000 г.

Из анализа одного из фрагментов взаимодействия (событие МАС69М 07.01.86 – Рисунок 1.7.6-в,г) специалистами было установлено [243], что в результате разрушения льда при воздействии на платформу ледового поля толщиной 1,5–2,0 м и размерами около 7×10 км возникли вибрации платформы с частотой 0,5–3,0 Гц, вызванной разрушением льда в течение 30 минутного контакта. К концу этого периода платформа получила критическое состояние, близкое к потере устойчивости на сдвиг по поверхности грунтового основания. Причиной явилось снижение порового давления в песчаном ядре основания, что привело к его разжижению, в связи с этим несущая способность основания под кессоном достигла критически минимальной величины.

В то время эти результаты были неожиданными для специалистов. На основании такого вывода можно предположить, что есть большая вероятность того, что сдвиг железобетонных кессонов оснований маяков в Ботническом заливе мог произойти по той же причине, что и в ситуации с платформой Моликпак, а разрушение башенных бетонных конструкций маяков могло произойти от усталости в результате длительных циклических нагрузок, подобным разрушениям стальных элементов ферменных конструкций буровых платформ в Бохайском заливе, разрушившихся по этой причине.

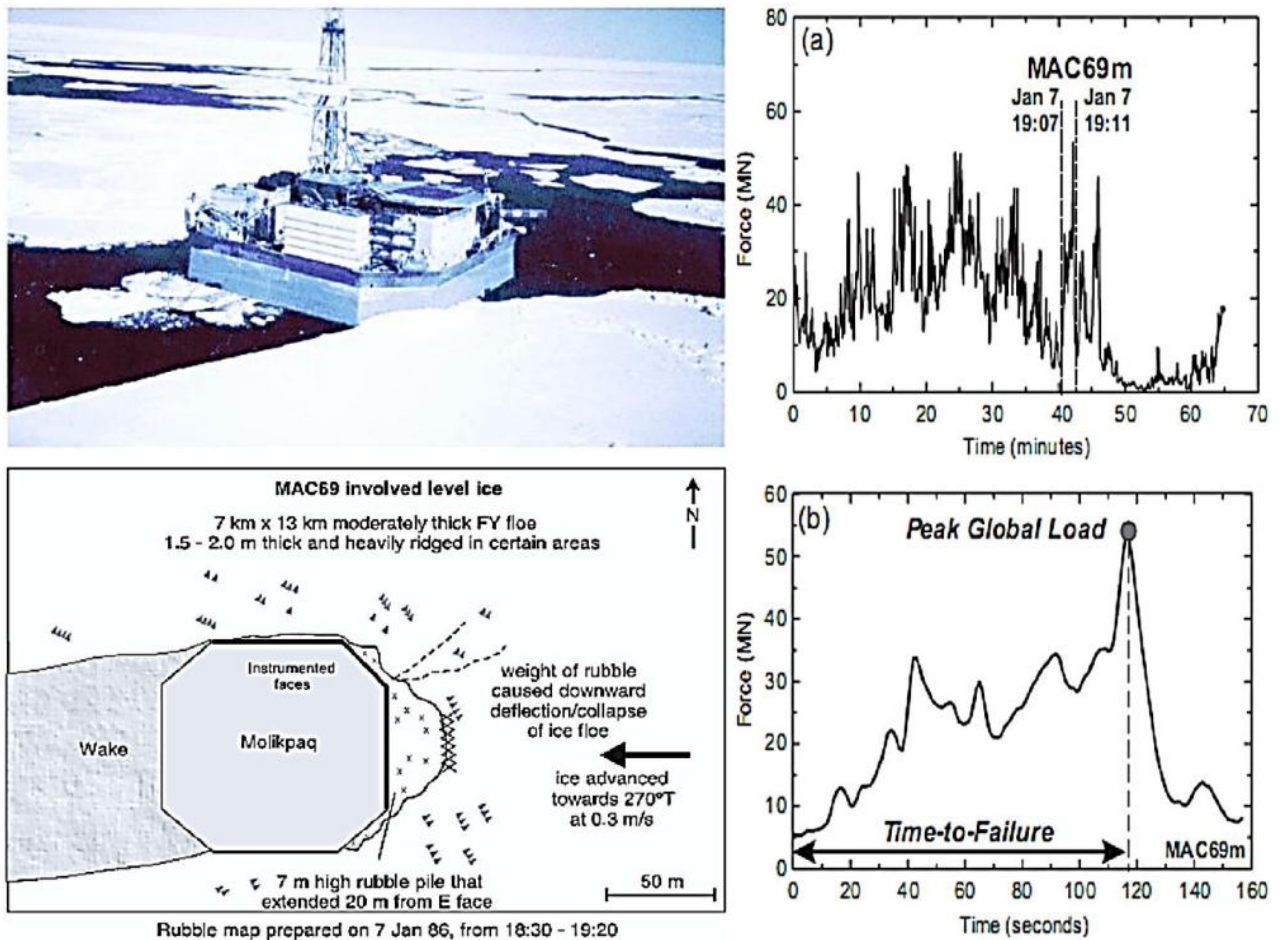


Рисунок 1.7.6 Платформа Моликпак, подвергнутая воздействию льда

В последние годы при строительстве нефтяных платформ на шельфе Сахалина также столкнулись с проблемой цикличности нагрузки и обеспечения прочности оснований этих уникальных сооружений [286, 365]. Опыт измерений на «Моликпак» показал, что *следует изменить классификацию сооружений*, подразделяющую их как на узкие и широкие, так же как на гибкие и жесткие. *Должен существовать единый подход* в исследованиях вибрации сооружений при воздействии льда, в котором должны учитываться: **масса, жесткость и частоты собственных колебаний сооружения** наряду с толщиной и скоростью ледового поля, определяющими реакцию сооружения на воздействие льда [243].

Приведённые в этом разделе примеры записей контактных сил характеризуют процесс взаимодействия ледяного поля с сооружением как нестационарное явление, которое носит ярко выраженный динамический характер. Резкие колебания значений контактных сил, как однозначно подтверждается всеми исследователями процесса взаимодействия ледяного поля с сооружениями, на работы которых здесь приведены ссылки, имеют *единую природу - периодическое разрушение льда на кромке движущейся ледяной плиты*, непосредственно прилегающей к поверхности опоры сооружения.

Неизбежность перехода к освоению больших глубин и растущая необходимость увеличения размеров (и массы) надводной части платформ значительно *усиливают влияние фактора цикличности нагрузок* от разрушения льда не только на общую прочность, но и на *предельную усталостную прочность элементов конструкций платформ, определяющих их долговечность*. Эта проблема уже решается [10, 49, 272] проектировщиками оснований морских ветро-генераторов. В отдельных районах Балтийского моря такие сооружения уже построены (Рисунок 1.7.7 – а, [10]), но с использованием результатов «индивидуальных рекомендаций» после специальных модельных исследований.

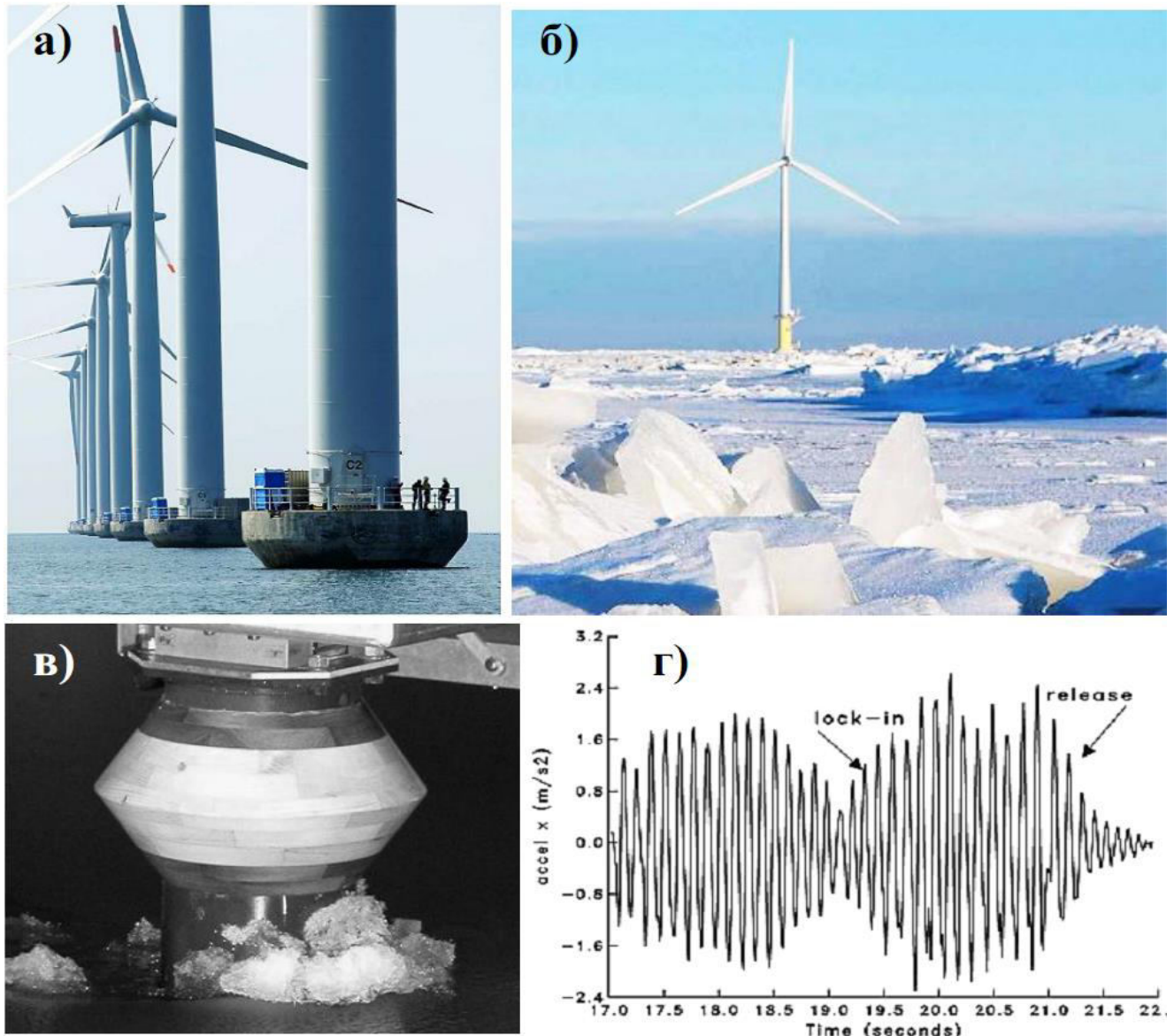


Рисунок 1.7.7 Возведение ледостойких ветровых генераторов на основе проектов, выполненных по результатам натурных [49] и лабораторных исследований [10]

Работы по изучению возникновения и развития вибрации сооружений при действии льда продолжают расширяться и углубляться не только с проведением натурных исследований на опытных сооружениях (Рисунок 1.7.7 – б [49]), но и с использованием

лабораторных опытов в ледовых бассейнах (Рисунок 1.7.7 – в,г [10]), а также путем проведения численного моделирования с применением вычислительных программных средств [87].

ВЫВОДЫ по разделу. Для надежного проектирования МЛО, подверженного стохастическим ледовым нагрузкам, требуются надежные значения исходных параметров, вводимых в расчетную модель (формулу) и обеспечивающих гарантированную надежность работы конструкции МЛО на протяжении проектируемого срока ее эксплуатации. Естественно, проектирование несущих конструкций сооружения должно производиться на воздействие экстремального значения силы давления льда, которое является непрерывно изменяющейся случайной величиной в расчетном периоде. Но вероятностные параметры ледовой силы не могут быть легко идентифицированы с помощью записи конечной длины ее измерений в поле. Для решения такой задачи с помощью предложенного подхода должны быть получены массивы статистических параметров ледовой силы либо из имеющихся хотя бы редких записей полевых измерений этой величины во времени в регионе, где проектируется возведение МЛО, или из специально организованных полевых измерений.

Как видно из краткого обзора, **период между максимальными значениями контактной силы** при взаимодействии сооружения с ледовым полем является одной из динамических характеристик внешнего проявления механизма разрушения льда, поэтому в качестве **расчетного параметра для расчетов морских сооружений на циклическую ледовую нагрузку следует применять частоту разрушения льда.** Поэтому для расчетов сооружения на циклическую ледовую нагрузку необходим еще один важнейший параметр колебательно процесса в системе ЛП–МЛО: время одного цикла разрушения льда – как расчетного параметра **периода повторения (частоты) пиков ледовой нагрузки**. Учитывая многофакторность

К настоящему времени пока не создано метода, который на основании полученных из инженерных изысканий в районе строительства шельфового сооружения исходных данных даст результат его **расчета на циклическую ледовую нагрузку в виде гарантированного срока эксплуатации такого сооружения в ледовых условиях района его возведения.**

Определенные гарантии точности получения статистически достоверного значения **максимальной амплитуды силы давления льда** на опору сооружения, также как и **периода цикличности разрушения льда** в рассматриваемой многофакторной задаче могут дать только вероятностные методы расчета надежности, которые в отличие от детерминистских вводят в явном виде **фактор времени**, что значительно повышает их информативность. Так, по аналогии с **расчетами строительных конструкций на воздействие**

нагрузок, имеющих стохастическую природу, в качестве метода, который с определенной степенью надежности позволит рассчитать **нормативную долговечность** МЛО может быть рассмотрен один из вероятностных методов В.В. Болотина, А.П. Ржаницина или Н.С. Стрелецкого [283,289,400,423]. Все эти методы основаны на использовании в расчетах вероятностной надежности сооружения

1.8 Общая постановка задачи обеспечения проектной надёжности МЛО

Основания морских буровых платформ являются **уникальными инженерными сооружениями**, для которых характерны также уникально **высокие стоимость** и материалоёмкость. Техногенная катастрофа на таком удаленном от берега сооружении, как промышленном высокотехнологичном объекте, тем более, его разрушение, сопряжено с **рисками гибели большого количества людей** или может привести к колоссальному **экологическому ущербу**, соизмеримому с затратами на возведение такого сооружения или более. Сегодня совершенно очевидно, что и к проектированию, и к строительству таких морских гидротехнических сооружений должны предъявляться самые высокие **требования к их безопасности** в течение необходимого срока эксплуатации.

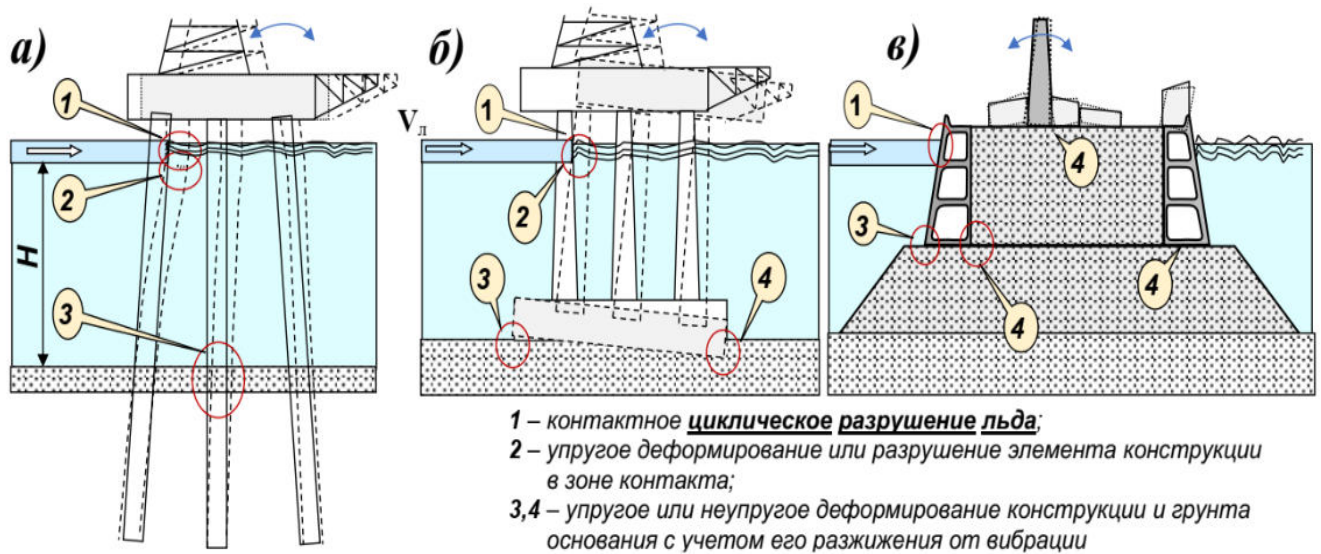


Рис. 1.8.1. Схемы взаимодействия ледового поля с морскими ледостойкими основаниями свайного типа, гравитационного типа «Кондип» и гравитационного типа с кессонами

Особенностью проектирования шельфового МЛО является то, что **внешние воздействия среды** (ветер, течения, цунами) воспринимаемые ледовым полем (ЛП), сообщают ему огромную **кинетическую энергию**, затрачиваемую на: упругое и неупругое деформирование всей конструкции сооружения, включая работу, затрачиваемую на дефор-

мирование грунта основания; на местное упругое деформирование или разрушение элементов конструкции; **на деформирование и разрушение льда** в месте контакта кромки ледового поля с поверхностью опорных конструкций сооружения (Рис. 1.8.1).

В процессе *разрушения движущейся ледовой плиты опорами* морского ледостойкого основания (МЛО) *контактная сила, вызывающая такое разрушение, одновременно является горизонтальной силой*, воздействующей на опоры МЛО, способной привести к *«предельному состоянию»¹* МЛО: разрушению или местному повреждению одной из опор (Рис. 1.8.1,а), либо сдвигу опорной плиты по грунтовому основанию с последующим опрокидыванием (Рис.1.8.1,б), т.е. привести к *«эксплуатационному ресурсному отказу»⁵* МЛО.

1.8.1 О нормировании проектной надёжности МЛО

Повышенные требования к безопасности шельфового сооружения обуславливают исключительную важность **комплекса расчётов сооружения – как этапа проектирования**, на котором именно и решается вопрос *выбора эффективной конструкции*, и где в качестве основного критерия ее эффективности рассматривается **надёжность или долговечность сооружения**. Прогнозирование надёжности, как частный случай расчета надёжности такого технически сложного и весьма дорогостоящего объекта как МЛО, должен осуществляться в полном соответствии с *положениями и требованиями, регламентированными системой Межгосударственных и российских стандартов* серий «Надёжность в технике» и «Надёжность строительных конструкций и оснований» [317,318,319,320,316], устанавливающих состав и общие **правила задания требований по надёжности**; общие правила расчета надёжности технических объектов; требования к методикам и порядок представления результатов расчета надёжности.

Согласно определению Межгосударственного стандарта «Надёжность строительных конструкций и оснований» [320], **надёжность строительного объекта есть: «Способность выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации»**. Следовательно, надёжность МЛО надо рассматривать как **совокупность трех групп требований: по безопасности, эксплуатационной пригодности и долговечности**. Поэтому, *морское ледостойкое сооружение должно иметь такие начальные расчетные характеристики, чтобы с надлежащей степенью надёжности при различных расчётных воздействиях удовлетворять требованиям:*

– **безопасности**: исключению возможности разрушения или нарушения эксплуатационной пригодности;

⁵ Определения согласно Межгосударственному стандарту 27.002–2015 «Надёжность в технике. Термины и определения»

- **эксплуатационной пригодности:** не возникновению повреждений, затрудняющих нормальную эксплуатацию сооружения и его оборудования;
- **долговечности:** удовлетворению требованиям по безопасности и эксплуатационной пригодности **в течение установленного длительного времени.**

Эти **характеристики надёжности** относятся к качественным определениям [392], но для оперирования в проектной практике этого недостаточно, потому что расчет надежности МЛО на этапе его проектирования **имеет своими целями:**

- обоснование **количественных требований по надежности к объекту** или его составным частям [317];
- **проверка соответствия ожидаемого (достигнутого) уровня надежности объекта установленным требованиям** (контроль надежности), если прямое экспериментальное подтверждение их уровня надежности невозможно технически или нецелесообразно экономически.

Поэтому требования по надежности МЛО - это **требования, устанавливаемые к количественным значениям показателей,** характеризующих такие свойства этого объекта, как безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость, которые определяют надежность объекта в целом [319]. Следовательно, ***понятие «надежность» необходимо выразить числом*** с тем, чтобы можно было: рассчитать надёжность МЛО; рассчитать сроки службы сооружения; исследовать пути повышения надёжности и определить требуемые для этого ресурсы (затраты). Для этих целей необходимы **критерии надёжности** – признаки, по которым она оценивается для конкретных сооружений, эксплуатируемых в конкретных условиях, воспринимающих **воздействия внешней среды.** Значит, ***критерии надёжности, их количественные характеристики зависят не только от технических параметров сооружений, но и от параметров нагрузки.***

Как известно [285,289,392,400], надёжность сооружения может быть выражена одним из нескольких критериев, различных по своей природе. Наиболее распространённый и «универсальный» **критерий надёжности – срок службы сооружения** до момента времени, когда оно перестаёт удовлетворять ***хотя бы по одному из трех*** рассмотренных выше основных требований. В соответствии с ГОСТ [316] в качестве показателя долговечности может быть принят полный средний срок службы, т.е. календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой дальнейшая работа МЛО ***технически невозможна или экономически нецелесообразна.***

На самом деле, **срок службы** любого сооружения, как **критерий надежности**, определяется большим числом факторов и может иметь различную «природу». Для многих из них он ***может определяться расчетом по предельным состояниям*** с учетом сложной совокупности ресурсов прочности и долговечности конструкционных материалов с

одной стороны и интенсивностью внешних воздействий на конструкцию – с другой стороны.

Для МЛО, в частности, этот срок для технико-экономических оценок надёжности может рассматриваться как нормативный ресурс [289]: **нормативный срок службы** проектируемого МЛО буровой платформы. Это одна из основных характеристик проекта, которая определяется с учётом ряда показателей: эффективности капиталовложений (срока их окупаемости), перспектив разведки и добычи нефти и газа на данной точке месторождения, в данной акватории, перспектив развития методов и средств разработки шельфа в будущие десятилетия с учетом освоенных в данном проекте технологий.

В доступных публикациях эти вопросы до настоящего времени комплексно и системно, с позиций надёжности методологии проектирования МЛО не рассматривались. В большинстве стран в настоящее время сооружения, предназначенные для эксплуатации в условиях шельфа, проектируются на **нормативный срок эксплуатации $T = 25 - 30$ лет** [3,52,438].

1.8.2 Обоснование подходов, методов и принципов расчетов проектной надёжности морских ледостойких оснований

Учитывая уникальность таких сооружений как МЛО, анализ рисков их отказов¹ должен производиться по всей совокупности приёмов и способов анализа, которая должна включать: феноменологический, детерминистический и вероятностный методы.

При **феноменологическом описании** возможных вариантов протекания аварийных процессов для проектируемого МЛО будем исходить из результатов анализа необходимых и достаточных условий, связанных с негативным проявлением тех или иных природных явлений и законов механики. В случае воздействия дрейфующего ЛП, запас его инерции в сочетании с прочностью льда, шириной и жесткостью опоры МЛО определяют **тип взаимодействия: прорезание ледового поля** опорой сооружения при значительных размерах (массах) полей; **остановка поля у сооружения** – при небольших его скорости и массе.

Исходя из цели возведения рассматриваемого типа искусственного объекта на морском шельфе в высоких широтах для добычи углеводородов, такое сооружение должно быть ледостойким, т.е. **надёжно функционировать во времени**⁶ в тяжёлых условиях его эксплуатации: обеспечивать разрушение дрейфующих ледовых полей (ЛП), оставаясь

⁶Слова "во времени" означают естественный ход времени, а не какой-либо конкретный интервал времени.

не только устойчивым и неразрушенным, но и обеспечивающим бурение скважин, откачку и первичную обработку нефти (газа) в штатном режиме. Это – **главная системная функция** таких сооружений [440], для реализации которой они проектируются и возводятся.

Таким образом, механическое взаимодействие ЛП и МЛО – *двух объектов* разной природы, порождает общее для них *комплексное качество (свойство)*: **явление разрушения льда и отклонение сооружения**, на которые затрачивается энергия, присущая одному из элементов (ЛП). Эта совокупность объектов соответствует определению *Системы* [281,337,383,421,440], а одно из основных *свойств Системы* по ее определению (см. Приложение X) – **устойчивое сохранение ее качества**, т.е. в данном случае, *постоянного генерирования процесса разрушения льда* (ЛП) и придания свойства «ледостойкости» сооружению (МЛО), поэтому, *при проектировании МЛО обязательным является принцип системности*.

Свойство Системы ЛП–МЛО – *сохранения стабильного состояния ее основного качества* – **функции обеспечения периодического разрушения льда и отклонений сооружения от вертикального положения**⁷, можно выразить количественно в виде неравенства, описывающего условие его **не наступления**, т.е. *условие гарантированной надежности МЛО*:

$$R - Q > 0, \quad (1.1)$$

где *R* – **прочность наиболее слабого или ответственного элемента конструкции** или обобщённая прочность всей конструкции *МЛО*; *Q* – входное воздействие, воспринимаемое расчётным элементом или обобщённый входной параметр, характеризующий **воздействие внешних сил на конструкцию в целом**.

Известно [283,289,400,423], что специфика теории надежности строительных конструкций состоит в необходимости учета **случайных свойств нагрузок** и воздействий на сооружения, а также учета их совместного действия на **систему со случайными прочностными характеристиками**. Значит, для обоснования «нормативного срока» надёжной эксплуатации МЛО, прежде всего, должны быть **обоснованы процедуры нормирования расчетных характеристик**. Для таких уникальных сооружений как МЛО характеристики надежности (например, долговечность) могут быть определены на основе свойств сооружения и параметров окружающей среды. Такими свойствами МЛО явля-

⁷ Как показано в первом разделе этой главы, разрушение льда – циклический процесс, поэтому существующая методология определения надежности конструкции с использованием метода предельных состояний, приводимая ниже, должна рассматриваться только в приложении к результату единичного цикла разрушения льда

ются, прежде всего, свойства строительных материалов – как массовых продуктов, испытываемых и оцениваемых статистически при их производстве; **внешние (ледовые и др.) нагрузки**, которые часто повторяются и могут быть оценены статистически; свойства грунтов, задаваемые для конкретного места; геометрические размеры и параметры жесткости элементов конструкции и сооружения в целом и т.д. Все эти параметры можно представить математически в виде детерминированных случайных величин или стохастических процессов, получаемых на основе статистических исследований, в теории надежности сооружений они определяются как «базисные переменные»: параметры внешней среды, конструктивные параметры и параметры надежности. Тогда предельное состояние конструкции можно описать в виде функции таких базисных переменных.

Поэтому, **проблема проектной надежности МЛО** может быть решена³, если известны нагрузки и воздействия на сооружение Q , а также его способность противостоять этим нагрузкам R за счет его свойств (жесткости конструкции и ее устойчивости на грунте). При этом возможно два подхода к решению неравенства (1.7): **детерминистический или вероятностный** (Рис. 1.8.2).

Детерминистический подход определения **надежности конструкции МЛО** может быть основан на расчетном принципе, реализуемом в методе предельных состояний, когда все входящие в расчёты величины являются условно постоянными параметрами конструкции и внешних воздействий на сооружение, т.е. **не являются функциями времени**. Метод учитывает возможные отклонения как действительных нагрузок, так и характеристик конструкционных материалов сооружения от среднестатистических значений в неблагоприятную сторону.

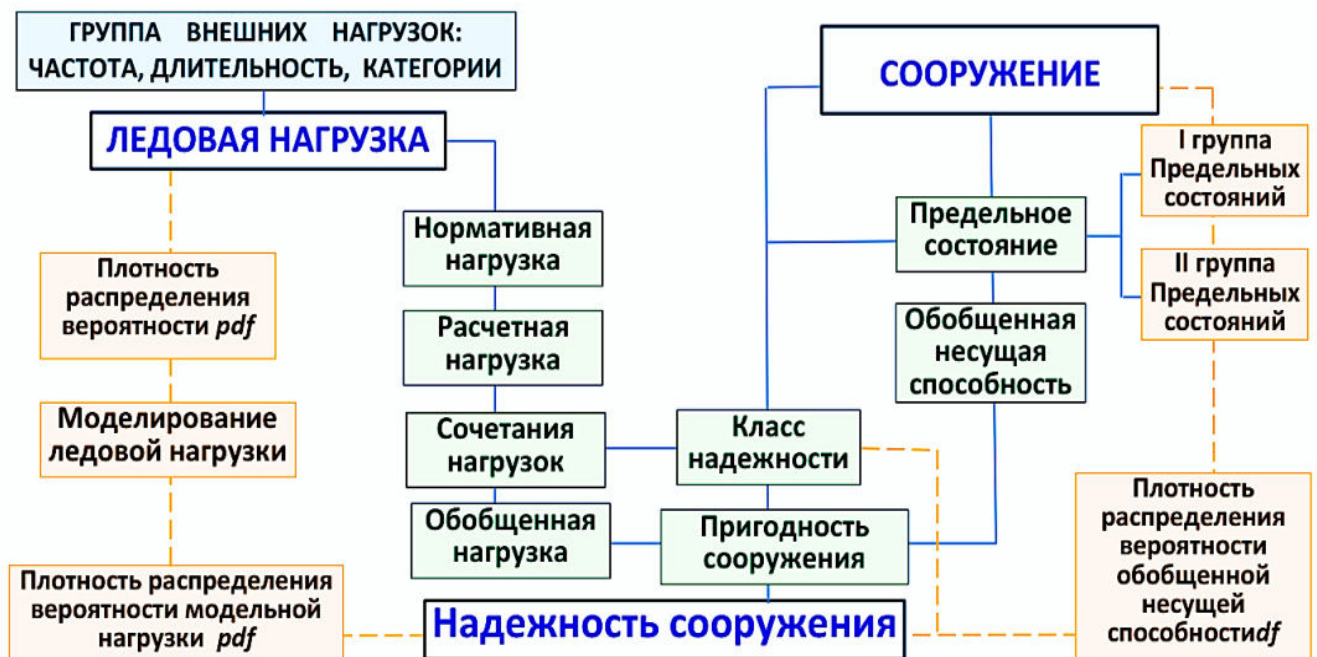


Рис. 1.8.2 Схемы детерминированного (в центре) и вероятностного (слева и справа) подходов к проектированию нормируемой надежности МЛО

Их неопределённость пренебрежимо мала, значения внешних воздействий (входных параметров) Q при этом определяются непосредственным измерением, а реакция (сопротивление) конструкции R на воздействие внешних факторов определяется простейшим перерасчётом через известный для этой конструкции «коэффициент фильтрации» или «коэффициент жесткости» - k . В большинстве случаев этот коэффициент функционально зависит от параметров сооружения и грунта основания ($d_0, H_m, \lambda_0, \zeta_{gp}$), внешних воздействий и факторов, а также многих переменных величин что в обобщённом виде можно представить так:

$$k = f(R, Q). \quad (1.2)$$

В реальных проектах методы, трактуемые как детерминистические, вернее называть полу-вероятностными, т.к. некоторые параметры (например, нагрузка или исходные данные для ее определения – *предел прочности льда*) принимаются к рассмотрению с некоторой обеспеченностью. В Российских Нормах обеспеченность нагрузок не специфицируется. Лишь для ряда параметров указывается величина периода повторяемости. Так, при расчете максимальной **ледовой нагрузки** следует учитывать значение толщины льда с обеспеченностью 10^{-2} /год (1 раз в 100 лет).

Если в конструкции предусмотреть некоторый «гарантирующий» запас, путем введения «коэффициента запаса надежности (прочности, устойчивости)» $\Theta > 1$, то с вероятностью, приближающейся к единице, приведенное ниже неравенство должно гарантировать надежность сооружения:

$$R > Q \cdot k \cdot \Theta. \quad (1.3)$$

Значения **ледовой нагрузки** Q , так же, как и несущая способность МЛЮ R , зависят от изменчивости многих факторов и статистически подчиняются закону нормального (гауссового) распределения (рис. 1.8.3). Выполнение условия (1.3) должно гарантировать несущую способность конструкций с проектируемым уровнем надежности. Таким образом, **нормативные сопротивления материалов** наряду с **нормативными нагрузками** являются определяющими величинами в расчете по методу предельных состояний.

Такой подход содержится в Нормах всех стран, для этого все сооружения разделялись на классы надежности в соответствии с их значимостью (ответственностью). Поэтому, назначение коэффициента надежности производится можно сказать произвольно, ориентируясь на опыт прошлого и не учитывая знаний о нагрузках, грунтах и материалах сооружения для конкретного района строительства, т.е., ориентируясь лишь на класс надежности сооружения. Согласно Нормам Канады CAN/CSA, существует два класса надежности (Нормы России выделяют четыре класса), которые присваивается в зависимости от рисков:

- **I** класс надежности, если при рассматриваемых условиях повреждение приведет к большому риску для жизни и загрязнению окружающей среды;
- **II** класс надежности, если при рассматриваемых условиях повреждение приведет к малому риску для жизни и загрязнению окружающей среды.

Согласно Российским Нормам, все шельфовые сооружения следует относить к I классу надежности.

Детерминистский подход к **определению ледовой нагрузки** на МЛО можно считать консервативным по отношению к вероятностным подходам, поскольку они позволяют экономить на материалах и др. затратах. Нормативный срок службы МЛО, таким образом, с нормируемым уровнем вероятности показывает, что сооружение, построенное в данном конкретном месте, будет нормально функционировать, воспринимая все те конкретные **нагрузки**, включая всевозможные их сочетания, которые случайным образом «выпадают» ему за нормируемое время его службы, включая **нагрузки** от воздействия природных факторов и полезные **нагрузки**. При этом нормируемый, т.е. расчётный срок с определённой вероятностью гарантии нормальной эксплуатации МЛО может совпасть или не совпасть с реальным сроком его полезной службы.

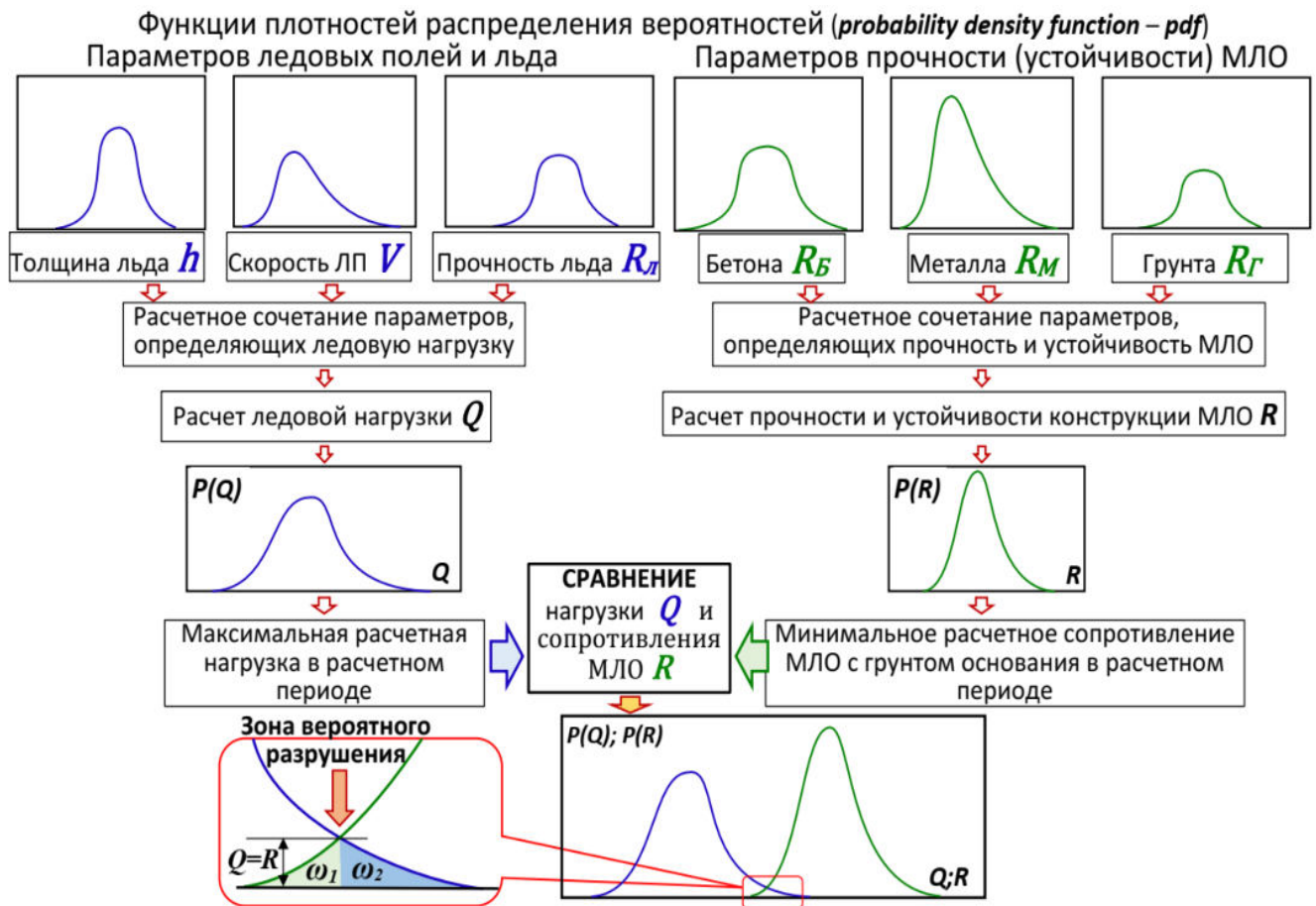


Рис. 1.8.3 Схема определения оценки вероятности разрушения МЛО

Вероятностный подход подразумевает, что, *воздействия*, особенно от природных факторов (ветровые, течения, волновые, ледовые), *есть случайные величины*, изменяющиеся как во времени, так и в зависимости от других случайных величин или от комбинации детерминированных величин (рис. 1.8.3).

Поэтому, в данном исследовании следует полагать, что, если *входные параметры системы (сооружения) Q случайны*, их неопределённости в той или иной мере передаются выходным параметрам системы, даже если она имеет постоянный «коэффициент фильтрации». Но и *параметры системы также имеют неопределённость*: на существующих конструкциях некоторые геометрические характеристики (длина элементов, углы сочленения) могут быть измерены достаточно точно, но некоторые (размеры поперечных сечений, привязка арматуры в бетоне) поддаются измерению лишь в ограниченном числе точек, между которыми они могут иметь другие значения.

Если принять, что вероятность выполнения неравенства (1.1) есть вероятность сохранности конструкции, то вероятность отказа МЛО (его разрушения) определяется выражением

$$P_Q = \int_{-\infty}^0 p(S) dS \quad (1.4)$$

По нижней оценке вероятности отказа по методу Н.С. Стрелецкого [423] вместо вероятности разрушения покажем другую меру безопасности МЛО – гарантию его неразрушимости (Рис. 1.8.3):

$$\Gamma = 1 - \omega_1 \cdot \omega_2, \quad (1.5)$$

где: $\omega_1 = \int_{-\infty}^R p(R) dR$ – вероятность реализации значения прочности ниже расчётного уровня; $\omega_2 = \int_{-\infty}^R p(R) dR$ – вероятность реализации значения нагрузки выше расчётного уровня (рис. 1.8.3).

«Механические» и «прочностные» свойства материалов, кроме того, что они изменяются от точки к точке (во времени эксплуатации и в объеме элемента), редко поддаются измерению на строительной площадке и могут быть оценены лишь косвенно и с определенной долей вероятности попадания в среднее значение. Так, сопротивление бетонных кубиков или цилиндров, отлитых в специальных формах, рассматривается как надёжная оценка прочности бетона в реальной конструкции [283], но с определенной степенью вероятности. Также как и многие образцы натурального льда, изготовленные для испытаний на прочность из выбуренных из ледового покрова кернов, будут иметь не идентичное физическое и химическое состояние со льдом, залегающим в толще ледового покрова, дей-

ствующего на МЛО в конкретный момент времени [330,386,404,419,425], но средние значения их прочности будут совпадать со средними значениями параметров льда в теле расчетного ледового поля.

Таким образом, использование вероятностного подхода требует знания функции плотности распределения вероятности **как нагрузки, так и несущей способности сооружения**. Но вероятность каждой из этих двух сравниваемых в формуле (1.2) величин с различными функциями распределения вероятностей $pdf\{Q(A, h, V_L, R_L)\}$ и $pdf\{R(d_0, R_B, R_M, R_G, H_M, \lambda_0, \zeta_{гр})\}$ есть сумма математических ожиданий комплекса исходных параметров, имеющих вероятностную природу. Так, прочность льда R_L может быть неравномерно распределена по площади A ледового поля, случайным образом оказавшимся в условиях неизбежности контакта с МЛО, также как и его скорость V_L и толщина h , также как и ветровая нагрузка и скорость течения, включая их особые сочетания с сейсмикой или цунами. Необходимый диаметр МЛО d_0 , его жесткость λ_0 , исходя из этого, будут рассчитаны с учетом глубины моря H_M , вероятностного распределения прочностных параметров выбранных конструкционных материалов $R_{Б,М}$, грунтов основания $\zeta_{гр}$ и R_G и пр.

1.8.3 Общая постановка проблемы обеспечения проектной надёжности МЛО с учетом параметров цикличности ледовой нагрузки

Основной критерий надежности (устойчивости или прочности) сооружения – это условие (1.7): $R > Q$. Оно может быть изображено графически в виде двух графиков (Рис.1.8.4) – функций плотностей распределения вероятностей ($pdf - p(\%)$) величин (R) и (Q), расположенных на горизонтальной оси сил. Сектора их накладывающихся участков A, B, C представляют зоны риска – где надежность МЛО не гарантирована и возможна потеря его устойчивости или разрушение.

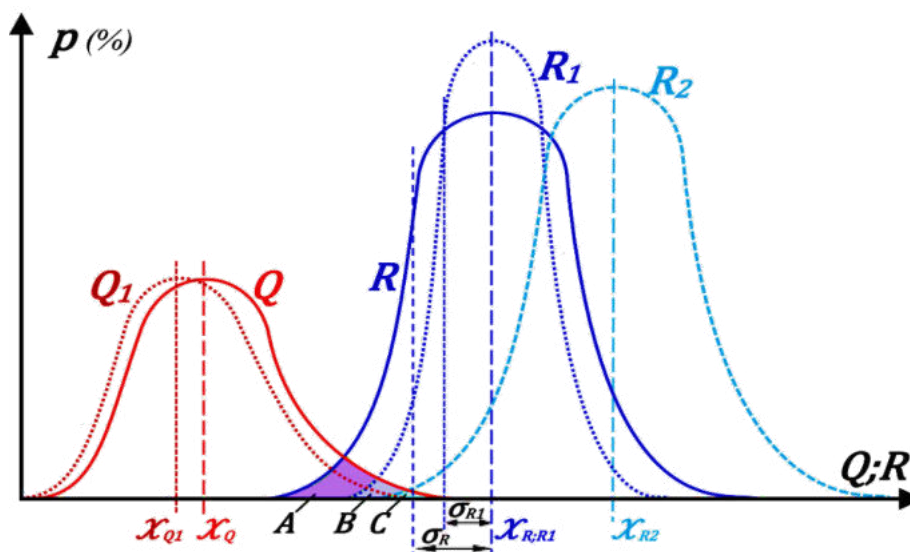


Рис. 1.8.4 Зоны рисков снижения надежности МЛО и методы ее повышения

С учетом показанных различий в постановке задачи определения надежности сооружений, их можно разделить на «прямую» и «обратную» задачи. Прямая (основная) задача состоит в определении **расчетной надежности сооружения**, возводимого по конкретному проекту в конкретных условиях местности и при установленном режиме эксплуатации. **Рассматриваемая здесь «обратная» задача** на основании установленного проектным заданием «нормативного срока» надежной эксплуатации МЛО в конкретных условиях внешней среды должна **дать решение** для определения искомых параметров конструкции МЛО при использовании в проекте конкретных материалов и технологий

Повышение надежности МЛО может быть достигнуто двумя путями.

Во-первых - снижением нагрузки на сооружение до Q_1 ;

1 – изменив формы его опоры в месте взаимодействия со льдом или изменив ее поперечный размер в направлении движения льда, тем самым снизив **среднее значение нагрузки** с X_Q до X_{Q1} ;

2 – усилением несущей способности МЛО за счет усиления его элементов и укрепления сцепления с грунтом дна (увеличением массы, площади опирания), или снизив среднее квадратичное отклонение функции $pdf\{R\}$ со значения σ_R до значения σ_{R1} за

счет применения более прочных материалов, например.

Второй путь достигается более простыми решениями, но он ведет к удорожанию конструкции (кривая S на Рис. 1.8.5). А это означает, что с экономической точки зрения, не имеет смысла создавать слишком надежные МЛО. Но, с другой стороны, чем ниже надежность сооружения, тем выше вероятность его разрушения, потерь жизней или загрязнения окружающей среды (кривая L на Рис. 1.8.5). Тогда надежность МЛО следует увеличивать.

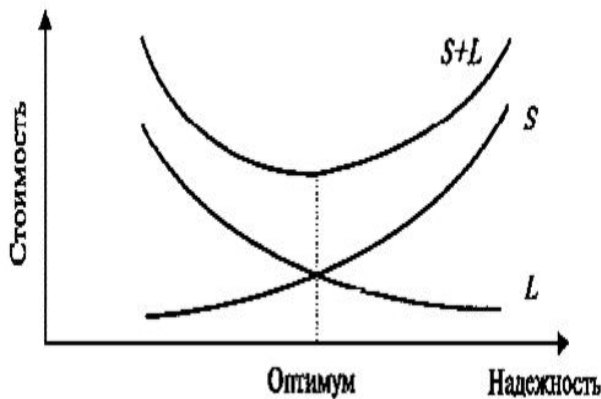


Рис. 1.8.5 Зависимость надежности сооружения от затрат:

S — стоимость сооружения;

L — возможный ущерб

Оптимум для каждого конкретного варианта проекта определяется **целевым уровнем надежности**, который и определит суммарные затраты проекта с учетом всех рисков (кривая $S+L$).

Отечественный стандарт, соответствующие Европейские нормы и Межгосударственный стандарт рекомендуют проводить расчеты для обеспечения надежности конструкции по методу предельных состояний, однако этот полувероятностный метод не даёт ответа на вопрос, насколько конструкция надёжна. В ряде случаев такого рода ответ

и оценку надёжности существующих конструкций, что особенно важно при анализе аварийных ситуаций, позволяет сделать применение методов теории надёжности. Но расчёт конструкций по заданной надёжности до сих пор является проблематичным, что затрудняет прогнозирование их качества.

Качество проекта МЛО во многом, если не в основном, определяется на стадии его расчетов, когда в качестве **основного критерия** его эффективности – как цели проектирования, рассматривается надёжность или долговечность сооружения. Надёжность морского ледостойкого основания, как здесь показано, является **комплексным понятием, относящимся к функционированию системе «ЛП – МЛО»**. Поэтому надёжность МЛО должна рассчитываться на всех стадиях жизненного цикла его Проекта и соответствующих этим стадиям этапам видов работ, что должно быть установлено программой обеспечения надёжности (ПОН) этого объекта или другими документами, ее заменяющими [317,318].

По имеющейся практике параметр надёжности, как показатель долговечности сооружения может определяться для МЛО как **гарантия его неразрушимости** (1.5), вычисленная по нижней оценке вероятности отказа как величина, обратная наступлению отказа (разрушения) объекта [423]. Покажем системное представление вероятностного расчета надёжности МЛО в виде, приведенном на Рис. 1.8.6.



Рис. 1.8.6 Системное представление вероятностного расчета надёжности МЛО

Реализуя **системный подход**, для теоретического определения вероятности наступления состояния отказа МЛО (по (1.5), например), **необходимо выполнить системную процедуру** (декомпозиция проблемы – анализ – синтез модели системы) в соответствии с выбранным методом расчета, пошагово (в порядке цифр на элементах блок-схемы на рис. 1.8.6) подбирая расчетные параметры МГТС, которые удовлетворят заданному в ТЗ критерию надежности:

- собрать, оценить и проанализировать необходимые **исходные статистические данные (1) и условия (2)** для выбора (вычисления) значений показателей надежности объекта;

- МГТС как объект, подлежащий расчету, идентифицировать по нормативным документам для **определения класса сооружения и уровня его ответственности** для Технического задания на проектирование (3);

- определить предельное состояние, для которого будет вычисляться требуемое для данного класса сооружения значение рассчитываемой вероятности отказа (**нормативная надежность МЛО** - 4);

- на основе феноменологических данных о явлениях и процессах разработать **математические модели** (5), определяющие взаимосвязи между внешними нагрузками и внутренними усилиями (напряжениями) во льду и в элементах конструкции для нескольких вариантов конструктивных решений МЛО;

- **выбрать метод(ы) расчета** и прогнозирования, адекватный(ые) особенностям МЛО как сооружения, целям расчета, наличию необходимой информации об объекте и исходных данных для расчета, а также выстроить достаточно простой **математический аппарат** для обработки случайных чисел и стохастических процессов (6);

- выполнить вероятностные расчеты **ледовой нагрузки** на сооружение для задаваемых вариантов параметров сооружения на каждом шаге на основе базисных переменных $pdf\{Q\}$ и $pdf\{R\}$ (7);

- **сопоставлять варианты результатов** вариантов вероятностного расчета надежности МГТС с заданным в ТЗ значением **показателя надежности** или требуемыми **качественными характеристиками** с учетом экономики (8);

- получив **положительный результат** сравнения расчетной надежности с заданной (9), перейти к рабочему проектированию.

Как известно [283,289,400,423], базисом, основой теории надежности строительных конструкций является описание вероятностного распределения базисных переменных $pdf\{Q\}$ и $pdf\{R\}$, то есть **случайных свойств нагрузок** и учета совместного действия этих нагрузок на сооружение – как **систему со случайными прочностными характеристиками**.

Обширный опыт поколений исследователей показывает, что *не существует* полных и универсальных «*критериев соответствия*» напряжённого состояния, развивающегося в массиве материала элемента сооружения и напряженного состояния в единичном малом образце того же конструкционного материала – как представительном объеме, подвергаемом испытанию по нормативной методике. В области ледовых проблем, также как и в других, существуют «*коэффициенты корректировки*» фактически полученных в опытах предельных значений «*напряжений, разрушающих образец*», вводимым в расчёты прочности и надёжности сооружений. Это коэффициенты «*условий работы*», «*сочетания нагрузок*», «*запаса прочности*», а также и другие, справедливо называемые «коэффициентами незнания».

Поэтому результат расчёта срока службы сооружения с определённой вероятностью обеспечения его надёжности обусловлен, в основном, соответствием (адекватностью) применяемых средств и методов определения **прочностных параметров льда и метода определения ледовой нагрузки**, адекватно описывающих реальный процесс разрушения льда на его контакте с опорой сооружения. Такие соответствия должны обосновываться фундаментальными законами физики и механики, что должно стать одной из **задач в достижении цели** данного исследования.

ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 1

Выполненный анализ существующих в настоящее время методологий расчетов ледовой нагрузки на морские ледостойкие основания сооружений различного назначения показал, что, несмотря на имеющуюся практику возведения таких сооружений в суровых ледовых условиях, как в РФ, так и за рубежом, **метода расчета, адекватно описывающего феноменологические процессы контактного взаимодействия ледового поля с сооружением** с учетом законов физики, в том числе законов сохранения, **не существует**. Имеющиеся **методологии расчетов ледовой нагрузки на МЛО** как **по концепции непрерывного разрушения, так и по концепции «зон высокого давления»** - (Давление – Площадь (P-A)), реализующие силовой подход и базирующиеся на пределе прочности льда, определяемом испытаниями на одноосное сжатие малых образцов, **не обеспечивают гарантированного высокого уровня расчетной надежности и долговечности** уникальных и дорогостоящих морских оснований.

Учитывая, что определение расчетной надежности и долговечности является вероятностной задачей первостепенной важности для каждого Проекта МЛО, а **силовой подход** к расчету ледовой нагрузки не может обеспечить получение динамических параметров процесса взаимодействия ледовых полей с МЛО в принципе, выводы, полученные в результате анализа существующей проблемы указывают на назревшую необходимость

изменения концептуального подхода к ее решению путем разработки нового метода расчета ледовой нагрузки на сооружения шельфа.

Новый метод должен базироваться на модели, описывающей процесс взаимодействия ледового поля с поверхностью сооружения *во времени* и с учетом механизма разрушения упруго сжатого объема льда, разгружающего этот объем *в момент сброса упругих деформаций* при достижении в нем *предельного* значения упруго запасенной энергии, являющегося *критерием объемного разрушения льда*. Такой метод должен обеспечивать не только получение расчетных значений максимальных нагрузок, адекватных реальным фактическим, но и их изменения в процессе контактного взаимодействия, которые должны быть основой расчета амплитуд и периодов колебаний сооружения от воздействия льда при его циклическом разрушении.

Учет *параметра времени* взаимодействия ледового поля с сооружением может дать энергетический подход к рассмотрению *процесса формирования циклической ледовой нагрузки* на сооружения. Решение проблемы необходимо искать через рассмотрение изменений *энергетического баланса системы лед-сооружение* в контактной зоне с выделением части энергии, затрачиваемой на разрушение льда, *как альтернативу силовому подходу*. Наиболее приемлемым выходом в данном случае может стать *использование критерия прочности (критерия разрушения)*, получаемого в условиях испытаний, которые в максимальной степени соответствуют условиям работы льда в его массиве у торцевой грани ледового поля.

Метод, использующий описание реальных процессов, развивающихся при взаимодействии льда с сооружением даст возможность *привести в соответствие вид разрушения льда в натуре и в способе его экспериментального определения*. Это соответствие, в свою очередь, должно обеспечить *соответствие расчетных параметров модели разрушения льда входным параметрам метода расчета сооружения*, что существенно повысит уровень прогноза надежности проектов сооружений МЛО. Поиск такого *метода и критерия*, как и соответствующего его определения *является сложной научно-методологической проблемой, которую предстоит решить*.

Результаты обобщения и анализа данных литературных источников, требований нормативных документов, а также результаты выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований *процесса взаимодействия ЛП с МГТС* позволили установить в нем ряд закономерностей, что предопределили *тематику и цель исследования* настоящей работы для решения рассматриваемой проблемы.

Цель работы. На основе исследования феноменологических особенностей разрушения льда и функционирования системы «Ледовое поле - МЛСП» **сформулировать, обосновать и разработать новую научно-практическую методологию определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на сооружение, основанную**

на использовании комплекса результатов современных исследований в области исследований морского льда и расчетов ледовых нагрузок и гарантирующую получение адекватных реальному процессу циклического разрушения льда параметров цикличности ледовой нагрузки для динамических расчетов на ледовую нагрузку морских гидротехнических объектов на надежность, обеспечивающую решение крупной социально-экономической проблемы освоения месторождений углеводородов в ледовитых морях России.

Методология определения ледовой нагрузки на МГТС в работе рассматривается как структурированный процесс получения решения актуальной проблемной ситуации и включает разработку методологически согласованных: динамической *имитационной модели* циклического разрушения льда для расчета контактной силы, использующей *энергетический подход*; теоретическое и экспериментальное обоснование *энергетического критерия разрушения* льда, как регулятора частоты циклов его разрушения; *способы получения* этого критерия испытаниями льда в массиве или на образцах; *метод получения расчетных параметров* для вычисления ледовой нагрузки на МГТС (максимального значения контактной силы и ее частоты); *метод верификации* расчетных параметров ледовой нагрузки.

Для достижения этой цели, в первую очередь, необходимо решить следующие основные задачи:

- выполнить анализ результатов экспериментально – теоретических исследований *механизма разрушения локальной области ледового поля и механизма разрушения льда в массиве ледяной плиты* в поле сжимающих контактных нагрузок от жесткой вертикальной цилиндрической поверхности опоры МГТС;

- выполнить исследование функционирования системы «Ледовое поле – МЛО», для определения, роли и места *механизма разрушения льда*, который должен стать *объектом исследования*, поскольку именно здесь, при разрушении льда *генерируется циклическая ледовая нагрузка* периодические отклонения конструкций МГТС в процессе их взаимодействия;

- выполнить теоретический анализ и численное *моделирование особенностей механизмов образования и развития трещин и их природы* в массиве льда контактной грани ЛП от внедрения в него вертикальной цилиндрической жесткой поверхности опоры МГТС;

- выделить критериальный параметр прочности, который должен представлять пороговое для начала разрушения льда значение упругой энергии, накапливаемой в локальном объеме массива льда у контактной грани ледового поля и быть *регулятором продолжительности циклов* разрушения льда – ледовой нагрузки на МГТС.

Глава 2 Анализ результатов экспериментально–теоретических исследований механики разрушения морского льда на контакте с вертикальными сооружениями

2.1. Строение и свойства морского льда

Исследованиями пресноводного и морского льда занимались с различными целями многие ученые и инженеры – практики. В данном исследовании результаты их работ рассматриваются, преимущественно в аспекте определения прочностных параметров льда, являющихся основой расчета ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения. Учитывая, что *максимальная ледовая нагрузка на сооружение проявляется в момент его разрушения*, исследование закономерностей явления разрушения этого уникального природного материала, обладающего рядом феноменологических особенностей, носит многогранный и разнообразный характер.

Свои работы изучению структуры морского льда, посвятили большое число как российских, так и зарубежных исследователей: Доронин Ю.П. [318], Зубов Н.Н. [323], Козловский А.М. [332], Назинцев Ю.Л. [364], Песчанский И.С. [374], Савельев Б.А. [400], Страхов М.В. [1], Черепанов Н.В. [441, 443], Шумский П.А. [447], Assur A. [1], Gow A.J. [1], Kovacs A. [133], Schulson E.M. [203], Schwarz, J. [205], Timco G.W. [236], Weeks W.F. [253], и многие другие.

Можно особо отметить монографии и учебные пособия Войтковского К.Ф. [296], Голубева В.Н. [301], Зубова Н.Н. [323], Лаврова В.В. [353], Савельева Б.А. [400], Цурикова В.Л. [439], Шумского П.А. [447], а также группы исследователей из Арктического и Антарктического института К.П. Тышко, Н.В. Черепанова и В.И. Федотова [419], «Кристаллическое строение морского ледяного покрова», которая содержит краткие интегрированные данные по этой тематике до 2000 года. Среди зарубежных изданий по данной тематике можно привести монографии Kovacs A. [133], Паундера Э. [371], Sanderson T.J.O. [201], Schulson E. M. [203], Weeks W.F. [253], коллективную монографию под редакцией Kingery W.D. [129].

2.1.1 Структура морского льда

Все исследователи отмечают, что в решении инженерных задач, связанных с механическим разрушением морского льда следует учитывать, что он является существенно неоднородным поликристаллическим телом сложной структуры и текстуры. Как отмечается в упомянутой выше монографии авторов из ААНИИ, «Его прочностные свойства, как и все его физические константы, в значительной степени определяются текстурными и структурными особенностями: содержанием воздушных и солевых включений, размерами и формой кристаллов, их пространственной ориентировкой и степенью упорядоченности. В зависимости от характера кристаллической структуры, лед может обладать отчетливо выраженными свойствами анизотропии или, наоборот, вести себя как изотропный материал» [419]. С изменением текстуры и структуры льда в ледяном поле самым существенным образом изменяются и его механические характеристики [136,301,400,419].

Схема процесса нарастания кристаллической структуры морского льда и основные особенности его текстуры и структуры, кардинально определяющих его механические свойства показаны на рисунке 2.1.1.

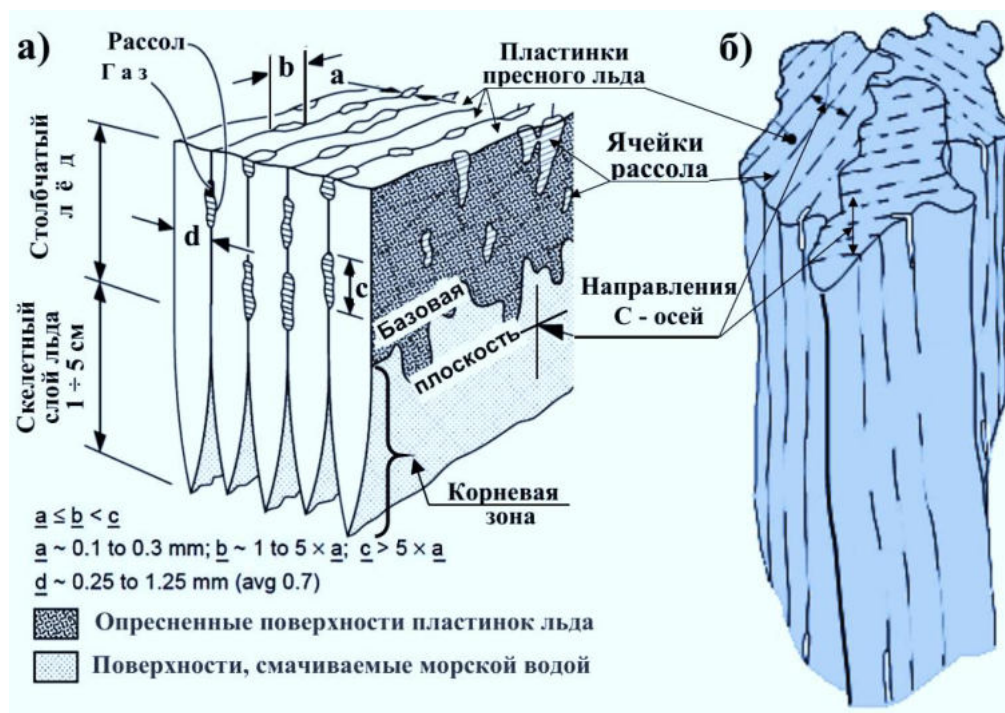


Рисунок 2.1.1 Структура и текстура морского льда по Kovacs A. [133]:

а) - схема образования кристалла морского льда из первичных пластинок; б) - вид столбчатых кристаллов неправильной формы

Образование кристалла льда (т.е. нуклеация – начало фазового перехода воды в

лед) происходит в виде появления на поверхности переохлажденного слоя воды зародышей – пластинок («бляшек») льда толщиной около 0,5 мм, имеющих различную форму в плане. Несколько пластинок чистого льда, смерзаясь базисными плоскостями, образуют кристаллы льда – твердые тела, обладающие трехмерно-периодической пространственной атомной структурой и имеющие форму правильных или неправильных многогранников. После образования первичного тонкого слоя льда из хаотически расположенных кристаллов различных размеров и конфигурации, при понижении температуры воздуха, начинается процесс нарастания одиночных кристаллов льда.

Рост кристаллов развивается вниз от дневной поверхности и состоит в постепенном нарастании их высоты в виде первичных (расположенных, как правило, вертикально) пластинок в нижнем, так называемом скелетном (или каркасном) слое поверхности ледового покрова – как показано на рисунке 2.1.1а. При дальнейшем замораживании пластинки несколько утолщаются, между ними появляются ледяные перемычки и постепенно образуется сплошной лед, в котором рассол и поры содержатся в виде капель или ячеек между пластинками. Направление оптических осей кристаллов перпендикулярно средней плоскости пластинок (рисунок 2.1.1).

Во всем объеме кристалла льда напряженное состояние выравнивается через сросшиеся на атомно-молекулярном уровне участки базисных плоскостей соседних пластинок. Но здесь же, внутри кристалла, в сечении базисных плоскостей оставшиеся не сросшимися участки поверхностей пластинок чистого льда – это площадки ослабления срастания в виде пор, полостей с рассолом, твердых включений.

Таким образом – как показано на рисунке 2.1.1б, кристаллы морского льда могут иметь столбчатое строение и сложную форму, а также содержать внутри тела кристалла прослойки рассола и воздушных включений. Природа пластинчатой структуры кристалла по мнению ряда ученых обуславливает ползучесть льда [353].

2.1.2 Текстура морского льда

Текстура льда – важнейшая составляющая строения морского льда, в большой степени *определяющая его прочностные параметры*. Текстура льда характеризуется формой и особенностями расположения во льду **воздушных и солевых включений**. В текстуре морского льда особое место занимает *его солевой и фазовый состав*, что, в основном, и отличает морской лед от пресного.

Включения разделяют на *первичные* – сформировавшиеся в процессе кристаллизации воды и на *вторичные* – сформировавшиеся после образования льда. Каждый тип включений характеризуется их формой, количеством, размерами, взаимным расположением и особенностями распределения. К *первичным* относятся **воздушные поры и ячейки**

с *рассолом*, образуемые в период формирования кристаллов, которые вмерзают внутри него между пластинками чистого льда (рисунок 2.1.1а). Кроме того, часть пор и рассола при замерзании пластинок чистого льда выжимаются на периферию – на границы между кристаллами, препятствуя их сmerzанию по боковым поверхностям, особенно в узлах смыкания ребер (рисунок 2.1.2а). Рассол в замкнутых ячейках с понижением температуры и замерзании чистой воды частично или полностью кристаллизуется, дополняя твердую фазу льда новыми **включениями кристаллов солей**.

Пористость морского льда. Пористостью льда называется процентное отношение суммарного объема пузырьков и полостей к объему чистого льда без пор в единице объема льда. Поры образуются при замерзании воды, когда растворенные в воде газы скапливаются в виде пузырьков и не имеют возможности всплыть на открытую поверхность воды. Такие поры могут быть зажаты между пластинками чистого льда или располагаться по границам кристаллов (рисунок 2.1.2а). поры во льду бывают в виде мелких сферических пузырьков и могут иметь форму вытянутых замкнутых ячеек. Большое количество пор снижает прозрачность льда, что характерно для средних и нижних слоев ледового покрова. По характеру распределения воздушных включений исследователи выделяют три типа льда [419]:

1. Монолитный (прозрачный) лед – без включений;
2. *Мелкопузыристый лед* - включения в виде мелких пузырьков воздуха диаметром до 0,2 см;
3. *Среднепузыристый лед* - сферические включения диаметром от 0,2 до 0,5 см

Наличие пор влияет на плотность, теплофизические и механические свойства ледяного покрова. Поры в морском льду почти всегда заполнены рассолом и водяным паром [366]. Пористость может быть выражена размерной величиной, равной объему пор в куске льда массой 1 кг. Пористость прозрачного льда составляет не более 1 см³/кг, морского льда — в пределах 1—50 см³/кг, и пористость снегового инфильтрационного льда составляет 50—400 см³/кг.

Безразмерная пористость v_i связана с плотностью ρ_0 монолитного (бесполостного) и плотностью пористого льда ρ_i соотношением [366]:

$$v_i = 1 - \frac{\rho_i}{\rho_0}. \quad (1.1)$$

Плотность морского льда. Теоретическое значение плотности кристалла чистого пресного льда при 0° С и атмосферном давлении 1000 мбар по данным П.А. Шумского [447] составляет 0,9168 г/см³ = 916,8 кг/м³. При замерзании объема воды увеличивается на 9%. Изменение плотности льда без пор под действием давления незначительно. Б.П. Вейнберг приводит в его монографии [288] коэффициент сжимаемости льда равный «от 1·10⁻⁵

до $5 \cdot 10^{-5}$ на 1 атм». Поэтому давление может оказывать существенное влияние на увеличение плотности реального морского льда, имеющего поры и примеси существенно отличается от теоретической.

Плотность льда увеличивается с понижением температуры (T) вследствие сжатия – уменьшения его объема. Она может быть вычислена по формуле [447]:

$$\rho_{iT} = \frac{\rho_i}{1 + \gamma T}, \quad (1.2)$$

где γ — коэффициент объемного теплового расширения чистого льда, среднее значение которого равно $1,58 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

В практических целях важное значение имеет плотность реального морского льда при различной солёности и при изменениях его температуры. Такие данные были получены разными авторами и приводятся в работах [323,374,400,419,447].

Слоистость морского льда. По толщине ледового покрова морские льды могут иметь *несколько слоев* (рисунок 2.1.2, в,г), отличающихся как по структуре, так и по текстуре. Это обуславливается периодами снижения и повышения температуры, снегопадами, дождем, неожиданными оттепелями с повышением влажности воздуха и изменениями уровня солнечной радиации, которая приводит к глубинному прогреванию ледового покрова и другими причинами..

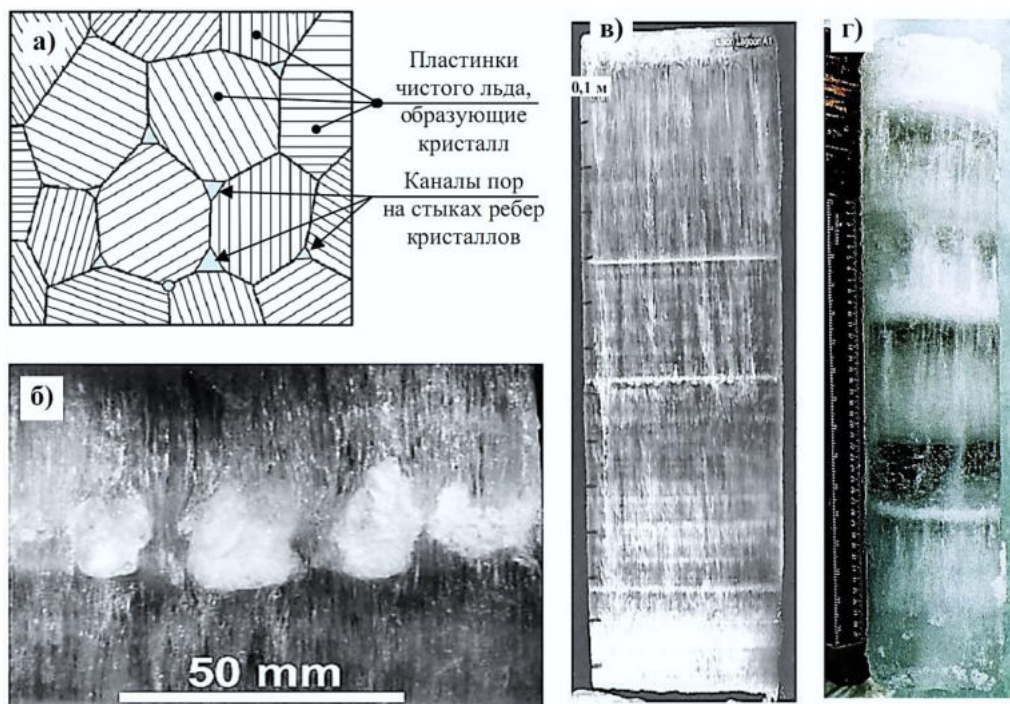


Рисунок 2.1.2 Поры, образованные в массиве льда в процессе формирования кристаллов при замерзании воды: а) – поры в узлах ребер соседних кристаллов; б) – фотография среза блока льда с газовыми пузырями по D.M. Cole и др. [24]; в) - фотография вертикального среза морского однолетнего льда высотой 140 см (Аляска) [24]; в) – керн льда Каспийского моря высотой 60 см, по [360]

И.В. Черепанов [443] отмечает, что наиболее часто слоистость структуры льда бывает вызвана резкими изменениями условий роста кристаллов, связанных с увеличением концентрации зародышей кристаллов у нижней поверхности льда. Благоприятными условиями для этого являются периоды значительных подвижек ледяного покрова когда появляются разломы льда, его торошение и образуются полыньи. Огромное количество мелких осколков льда, образующихся в эти периоды, являясь зародышами новых кристаллов, перемещаются подо льдом под действие дрейфа и течений. Они примерзают к нижней поверхности льда, нарушая нормальный ход кристаллизации и образуют резко выраженную границу [318].

2.1.3 Соленость морского льда

Соленость морского льда при любых вариациях перечисленных параметров является определяющим из них. Характер распределения солевых включений в морском льду (рисунок 2.1.3) и их объемы всегда связаны с его строением, возрастом, скоростью льдообразования и интенсивностью перемешивания воды в процессе нарастания льда. В среднем солёность льда в 4 раза ниже солёности образовавшей его воды, колеблясь от 0 до 15‰ (в среднем $3 \div 8$ ‰). Размеры, формы и распределение солевых включений зависят от типа кристаллической структуры льда. При идентичных условиях намерзания: чем мельче кристаллы, тем разнообразнее форма и размеры солевых включений между ними. Понижение температуры льда после первичного льдообразования приводит к уменьшению размеров заполненных рассолом ячеек, которые постепенно из длинных вертикальных цилиндров почти микроскопических размеров в поперечном сечении трансформируются в округлые формы, как энергетически более устойчивые.

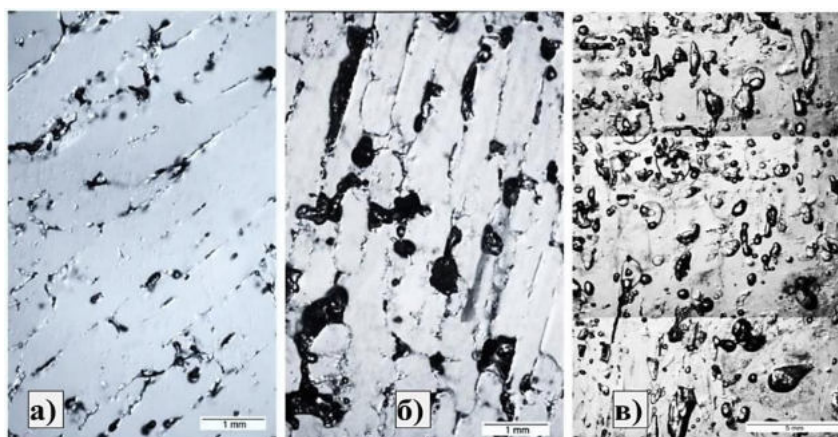


Рисунок 2.1.4 Распределение рассола в структуре льда на микрофотографиях шлифов кристаллов льда Чукотского моря по D.M. Cole, J.P. и др.- [24]). Темные поры – ячейки из которых рассол стек вниз. Горизонтальные срезы льда с низкой пористостью – а) и б) – с высокой пористостью; в) – срез между пластинок чистого льда параллельно оси C

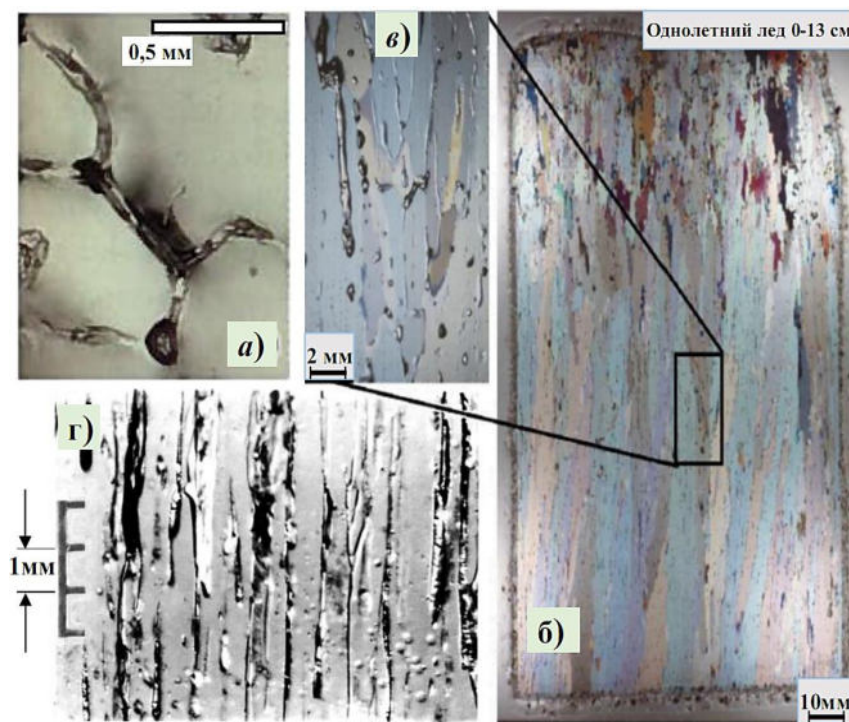


Рисунок 2.1.3 Распределение солей в виде рассола в структуре льда: а) – ячейки рассола и прожилки соляного раствора между кристаллами льда в поперечном контуре (по [183]); б– в) ячейки, прожилки и каналы транзита рассола между кристаллами льда на вертикальном разрезе блока льда [236]; г) – прослойки рассола между пластинками пресного льда внутри кристалла по его высоте ([23])

Некоторое количество ячеек рассола имеется также у границ между кристаллами (рисунок 2.1.3а; 2.1.4а). Основная масса рассола, в зависимости от значения общей солености льда, может содержаться как в межзеренных прослойках и включениях в местах соприкосновения углов кристаллов (рисунок 2.1.3а; 2.1.4а), так и внутри отдельных зерен (рисунки 2.1.4,г; 5). При спокойном намерзании льда соли в большей степени отжимаются растущими вниз и утолщающимися пластинками чистого льда (рисунок 2.1.5а), чем при быстром замерзании сильно переохлажденной воды, когда существенное количество солей остается «захваченными» растущей структурой кристалла (рисунок 2.1.5б). Поэтому, количество рассола солей внутри кристаллов может различаться на порядок.

При рассмотрении шлифов на рисунке 2.1.4,г видно, что ширина наиболее крупных включений рассола, расположенных между пластинками чистого льда ограничивается их границами и часто они вытянуты в плоскости этих границ. Как видно на вертикальном срезе (рисунок 2.1.4,б,в), включения рассола, как правило, распространяются на всю, или на большую часть толщины льда. Местами эти включения по высоте пересекают полосу с высокой пористостью (рисунок 2.1.3,в), часто соединяясь с другими включениями, образуя своеобразные ареалы.

2.1.4 Фазовый состав морского льда и его изменения

Морской лед существенно отличается от пресного, прежде всего, наличием в его составе солей, которые до образования льда были растворены в морской воде. Температура начала замерзания морской воды, представляющей раствор солей, определяется ее общей солёностью. При постепенном понижении температуры в воде образуются пластинки чистого льда, объем жидкой воды постепенно снижается, а растворенные в ней соли концентрируются, образуя рассол. При перенасыщении рассола, часть солей кристаллизуется, образуя твердую фазу. Таким образом, морской лед представляет собой конгломерат, состоящий из кристаллов чистого пресного льда, ячеек солевого рассола, заключенных между ними, воздушных и органических включений [24,133,296,323,353,360,371,400,439]. Практически все механические и теплофизические свойства морского льда зависят (прямо или опосредованно) от таких взаимосвязанных между собой параметров как структура и текстура, солёность, температура, плотность, и пористость, которые изменяются с течением времени жизни ледового покрова. В настоящее время представление о фазовом и химическом составе морского льда основывается на уникальных экспериментальных исследованиях В.Е. Рингера, К.Э. Гиттермана, К.Х. Нельсона и Т.Г. Томпсона [360].

Образование различных фаз в концентрированном растворе одной соли и их преобразование в охлажденном до температуры замерзания и ниже происходит по элементарной схеме. Например, две фазы — пресный (чистый) лед и рассол, сохраняются при охлаждении раствора соли NaCl до температуры $-21,2^\circ \text{C}$. При этой температуре, называемой *эвтектической*, раствор такой соли становится насыщенным и начинает выкристаллизовываться в виде твердой фазы $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Если не повысить температуру, система из *двух твердых фаз* (чистый лед и кристаллы соли) будет существовать, пока раствор полностью не затвердеет без изменения состава системы. В морской воде, состоящей из большего количества солей, при замерзании происходят более сложные фазовые преобразования, в которых участвуют многие соли, имеющие различные эвтектические температуры. Но образующийся в природе из морской воды лед содержит те же химические элементы, что и вода, но в меньшей концентрации (Табл. 1)

Таблица 2.1.1 Характеристики фазовых переходов в морском льду по данным Weeks W. F. and Ackley S. F. [252]

Состав системы	Плотность г/см^3	Начальная температура выпадения соли из рассола морской воды, $^\circ\text{C}$	Эвтектическая температура в водном растворе, $^\circ\text{C}$
----------------	---------------------------	--	---

Ca-			
CO ₃ ·6H ₂ O	1,771	- 2,2	- 2,2
Na ₂ SO ₄ ·10			
H ₂ O	1,464	- 8,2	-3,6
NaCl 2·H ₂ O	1,630	-22,9	- 21,1
MgCl ₂ ·12			
H ₂ O	1,240	-43,2	-33,6
KCl	1,984	-36,8	- 11,1
CaCh 6·H ₂ O	1,718	-55,0	-55,0
MgCl ₂ ·8			
H ₂ O	(1,24)	-33,6?	-43,2?
		-18,0?	-33,6 ?

2.1.5 Миграция рассола в толще ледового покрова

Миграция рассола в толще ледового покрова происходит под действием многих факторов, таких как: наличие температурного градиента в толще ледового покрова; стекание рассола под действием гравитации; действие гидростатического давления, выжимающего рассол из кристаллов на их границы; вымывание рассола давлением талой воды на поверхности льда. Распределение приоритетности влияния перечисленных факторов на результат опреснения льда в ледовом покрове точно не установлено, но существует их определенная взаимосвязь в развитии процессов миграции рассола в направлении к его нижней поверхности.

По данным наблюдений на дрейфующих станциях «Северный полюс» температура приледного слоя воздуха зимой составляет (–40) — (–50) °С [375]. Несмотря на то, что для покрытого снегом ледяного покрова Арктического бассейна минимальная температура, как правило, редко опускается до таких значений [366], поэтому соленость верхней части ледового покрова всегда имеет значительные превышения над ее средним значением по толщине.

В холодный период, когда лед нарастает, в его более холодной верхней части происходит «выталкивание» рассола из кристаллов на их периферию, где концентрация солей и давление в ячейках рассола возрастает, что приводит к разрушению окружающего льда вдоль направлений основных плоскостей кристаллов, что ведет к стеканию рассола. Это связано также с тем, что, когда лед становится толще, его поверхность постепенно поднимается над уровнем воды, это создает некоторый напор в соединенных между собой

канальцах с рассолом - давление, которое заставляет рассол вытекать из льда. Этот механизм не рассматривается как механизм, обуславливающий значительные потери рассола.

В периоды потепления и во второй половине зимы с постепенным устойчивым повышением среднесуточной температуры воздуха градиенты температуры во льду ведут к формированию градиентов концентрации в ячейках рассола (рисунок 6а). Так как плотность рассола, находящегося в равновесии со льдом, определяется распределением температуры, когда последняя увеличивается сверху вниз, в каналах с рассолом существует неустойчивое вертикальное распределение плотности. Поэтому лед в теплой части ячейки рассола плавится, в то время как в холодной части происходит замерзание, что диктуется условием соблюдения фазового равновесия. Таким образом происходит миграции ячеек рассола по направлению к нижней - теплой части льда.

Комплекс схем и фотографий на рисунке 2.1.5 иллюстрирует все процессы миграции рассола в толще ледового покрова, начиная с рассмотрения движения одиночной ячейки рассола вниз по Э. Паундеру [371]. На фотографии участка поверхности льда (рисунок 2.1.5,б) показан вид сверху на большой вертикальный дренажный канал под поверхностью льда с сетью питающих дренажей по С. Petrich и др. [183], а под ним приведена схема сбора стекающего в такой канал рассола из солевых ячеек по R.A. Lake и E.L. Lewis [141]. Перемещаясь вниз от холодной поверхности льда к нижней более теплой, пути миграции солевых включений образуют сложную ветвистую систему из трубчатых и капиллярных пор, стоковых канальцев и русел, напоминающих по строению ствол и ветви дерева.

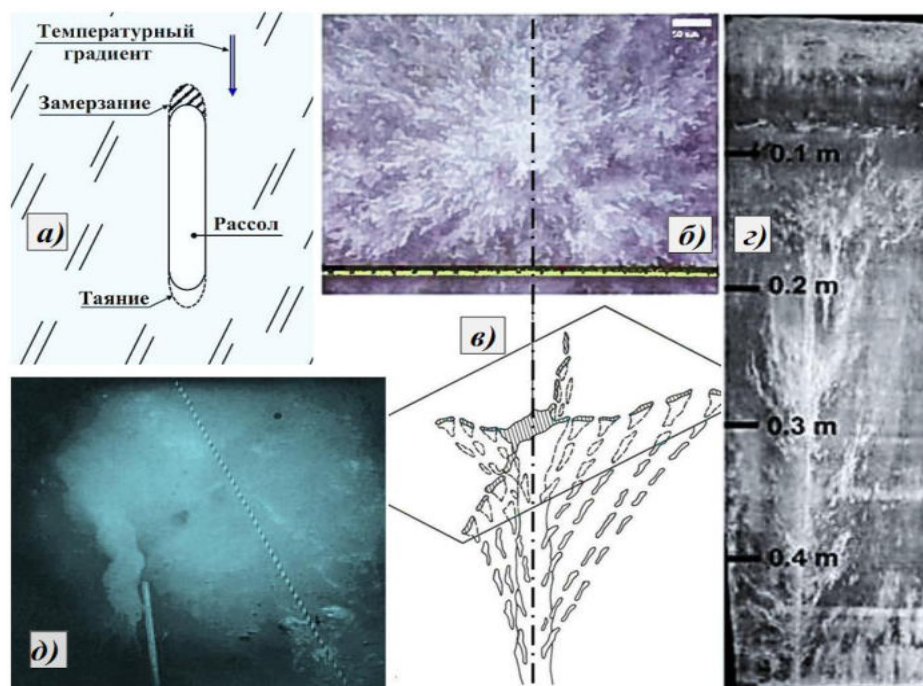


Рисунок 2.1.5 Схемы и фотографии, иллюстрирующие термодинамический процесс миграции рассола в морском льду и его результаты

Фотография вертикального разреза льда по D.M. Cole и др. [24] на рисунке 2.1.5,г показывает сечение такого вертикального дренажного канала, который выводит сток рассола на нижнюю поверхность ледяного покрова. Здесь, в продолжение канала во льду, часто образуются полые соляные сосульки — сталактиты, как показывает фото на рисунке бд из работы А. Kovacs [133]. В данном случае эта сосулька имеет длину в 1 метр, но в литературе упоминаются размеры таких образований под многолетним льдом до 6 метров длины.

Проведенный анализ показывает, что гравитационное просачивание рассола из толщи морского ледового покрова в подстилающую воду является гравитационным процессом. Дренажные каналы размером в 5 мм в диаметре и более обеспечивают не только стекание тяжелого рассола в морскую воду, но и обмен между более плотным рассолом во льду и подстилающей морской водой.

К этому же типу гравитационного стекания рассола относится и вымывание рассола которое происходит весной и летом вследствие гидростатического напора, оказываемого талой водой на поверхности. В частности, это относится к арктическому морскому льду. W. F. Weeks и S. F. Ackley [252] полагают, что «вымывание» является наиболее эффективным механизмом летнего опреснения, поскольку момент начала «вымывания»

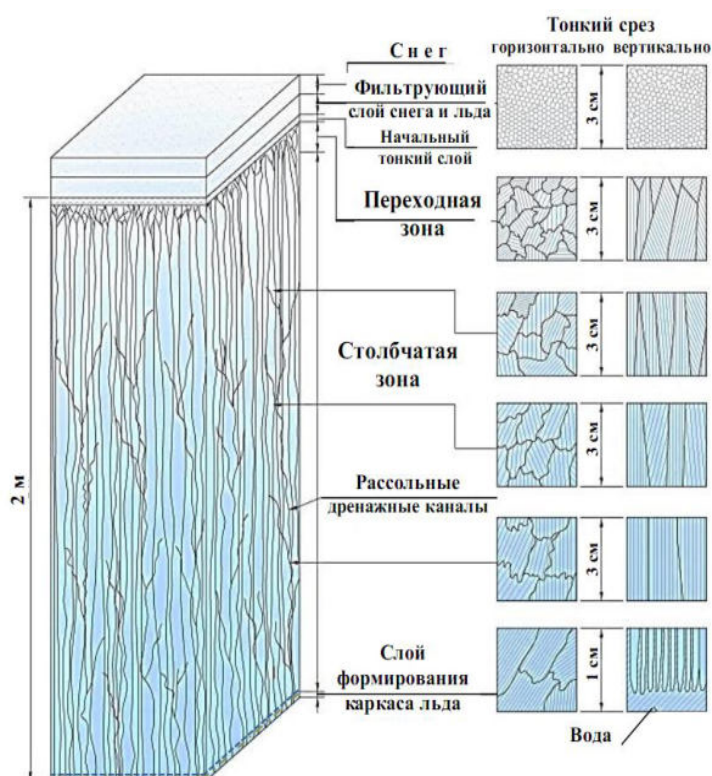


Рисунок 2.1.6 Строение льда волокнистой структуры по Schwarz, J. и Weeks, W. F. – [205];

факт), ориентировка направления приложения силы (давления) относительно плоскости намерзания. В существующих сегодня нормативных методиках ряда стран некоторые

соответствует окончанию весны и началу лета. Именно в этот период, особенно в верхнем 50—100 сантиметровом слое происходят наиболее существенные изменения солености льда.

В результате исследований выявлено, что значения прочностных параметров льда зависят от ряда факторов, наиболее значимыми из которых являются **строение и температура льда, его соленость, скорость деформирования образца (скорость приложения нагрузки) и его размеры (масштабный эффект)**, ориентировка направления приложения силы (давления) относительно плоскости намерзания.

из этих факторов приняты в качестве расчетных *параметров, обуславливающих значение показателя прочности льда*, напрямую или опосредованно *входящих в формулу расчета ледовой нагрузки* на сооружение. При этом, уровни влияния таких параметров на прочность льда может учитываться по-разному, что говорит о необходимости дополнительных исследований влияния этих параметров на процесс разрушения морского льда.

ВЫВОДЫ

Строение морского льда существенно отличается от речного и оно хорошо изучено и описано в работах многих отечественных и зарубежных исследователей. Рисунок 2.1.6. Именно уникальное строение морского льда обуславливает его *необычные физико-механические характеристики*, поэтому изучением строения морского льда многие исследователи занимались с позиции решения инженерных задач. И поэтому также, для понимания механики разрушения морского льда очень *важно понять и оценить вклад в этот процесс именно строения морского льда: его текстуры и структуры*.

Морской лед, как деформируемое твердое тело, оказывающее мощное силовое воздействие на искусственные сооружения – физически очень сложный материал, представляющий собой **гетерогенную (многокомпонентную) систему**, элементами в которой являются кристаллы чистого льда; кристаллы различных солей; рассол (раствор солей в воде); поры воздуха, а также твердые или биогенные включения. В зависимости от характера кристаллической структуры, лед может обладать отчетливо выраженными свойствами анизотропии или, наоборот, вести себя как изотропный материал. Соотношения элементов в данной системе постоянно изменяется во времени, как по толщине ледового покрова, так и по площади его простираения.

Пространственно-временная изменчивость структуры и текстуры морского льда, его солёности, пористости, температуры и зависящей от них прочности значительно усложняет начальные условия для получения решения задачи исследования. В пределах температурного диапазона $\pm 0,0 \div 40^\circ\text{C}$ своего существования в природе, так же как и при разных скоростях его нагружения, морской лед под нагрузкой может проявлять как свойства ползучести (текучести), так и выраженной хрупкости. Поэтому, несмотря на очень большое количество полученных данных по физико-механическим свойствам морского льда, **проблема «надёжности соответствия» его прочностных характеристик**, полученных при испытании образцов из него, **виду и критическим значениям прочности в контактной зоне** массива ледового поля все еще остается открытой.

Поэтому, для разработки метода расчета ледовой нагрузки, адекватного реальным

процессам разрушения льда на опорах сооружений необходимо **произвести всеобъемлющий анализ результатов экспериментальных исследований механизмов и закономерностей разрушения льда при контактном взаимодействии призматических опор сооружений**, выполнявшихся ранее в разных странах как с натурными объектами, так и с их моделями в ледовых бассейнах

2.2. Анализ результатов экспериментальных исследований механизмов и закономерностей разрушения льда при контактном взаимодействии с моделями призматических опор сооружений

Большая стоимость полномасштабных измерений ледовых сил на реальных сооружениях, как и на натурном льду с использованием моделей опор, а также невозможность оперативного изменения условий взаимодействия сооружения с ледовым полем стимулировали широкое применение лабораторных исследований этого сложного процесса.

Экспериментальные исследования по изучению этого процесса на моделях в ледовых бассейнах проводились и широко проводятся в настоящее время для выявления *основных закономерностей разрушения льда*, а также *построения математических моделей*, описывающих количественные зависимости величины нагрузки, как от прочностных и деформативных свойств льда, так и от геометрических, кинематических и кинетических параметров ледовых полей и сооружений. Наряду с исследованиями процесса взаимодействия ледовых полей с реальными морскими сооружениями, иногда лабораторные исследования служат для отработки методологии, предварительного выбора факторов (величин), которые необходимо исследовать в реальных или полунатурных экспериментах [113]. Изучению влияния этих факторов на механику разрушения льда, а также изучению закономерностей распределения давления льда по контактной площади опор различной формы посвящены работы многих исследований.

Полноту физико-механических процессов при контактном разрушении льда обеспечивают применяемые во многих работах, помимо тензометрических плит и консолей, инденторы с сенсорными датчиками давления. Они использованы в работах Frederking с соавторами [17], Kamesaki с соавторами [38], Sodhi с соавторами [81], Takeuchi с соавторами [87], Kryzhevich с соавторами [48]. Но более целостную картину напряженного контактного поля удалось зафиксировать при использовании пластиковой тензометрической пленки-оболочки модели опоры, примененной в работе Höderath с соавторами [27], а также пленки тактильного действия, окрашивающейся в различные цвета в зависимости от величины давления на каждом участке – Takeuchi с соавторами [88].

Первыми экспериментами по исследованиям взаимодействия ледяного поля с моделью сооружения, выполненными *в лабораторных условиях на моделированном льду* были эксперименты Афанасьева с соавторами [111], выполненные в ледовом бассейне Арктического и Антарктического Научно–исследовательского института (ААНИИ) в 1970–71 г.г. Здесь же в 1972 г. были проведены лабораторные исследования другой группы исследователей – С.А. Вершинина с соавторами [113].

Важным результатом этих экспериментов стало выявление *двух основных типов разрушения* движущегося льда перед опорой: *прорезанием и потерей устойчивости* ледового поля. Было установлено, что контактная сила при прорезании льда всегда больше, чем при потере устойчивости пластины и поэтому *расчетным случаем всегда будет случай прорезания льда опорой*.

Вторым важным результатом было зарегистрированное на осциллограммах **явление циклического разрушения льда при прорезании ледового поля опорой**. Когда нагрузка на модель опоры достигала некоторого критического значения, поле моделированного льда *в зоне контакта разрушалось*, нагрузка падала практически до нулевого значения, затем процесс повторялся.

Кроме того, в качестве характерной особенности процесса взаимодействия в описываемых исследованиях было отмечено, что *первый пик нагрузки при разрушении торцевой грани модели ледового поля всегда превышает последующие*. Но для опор большого диаметра этот пик в 3–4 раза превышает последующие пики нагрузки, а для опор малого диаметра пики нагрузки примерно одинаковы.

Опыты показали *принципиальную возможность выполнения модельных исследований в малом масштабе* и позволили выявить существенную **зависимость величины контактных напряжений от параметра D/h и скорости движения ледяного поля V** . Следует отметить, что эти первые лабораторные исследования не решили проблему, но выявили ряд важнейших вопросов, без решения которых проблема нормирования расчетов ледовых нагрузок на шельфовые сооружения не может быть решена. Начиная с первых публикаций результатов проведенных исследований в ледовом бассейне ААНИИ [111,113] объем исследований, выполняемых в ледовых бассейнах, начал резко расти, что объясняется увеличением числа и мощности ледовых бассейнов и совершенствованием методики проведения исследований. Подобные работы получили широкое развитие, их результаты постоянно пополняют базу данных для исследования рассматриваемой проблемы.

2.2.1 Изучение механизмов разрушений льда моделями в ледовых бассейнах

Исследования, направленные на изучение механизмов разрушений льда на опорах сооружений, стало одной из основных целей практически всех исследований по данной проблеме после того, как уже в первых экспериментах в первом ледовом бассейне

ААНИИ в 1971-72 г.г. на модельном льду было зафиксировано, что существенную роль в процессе разрушения льда играют **вертикальные радиальные трещины** [111]. Несколько позже, в этом же бассейне, исследования выполненные В.А. Вершининым с соавторами [113], показали также, что разрушение льда в зоне контакта происходит по некоторым поверхностям, по которым осуществляется *сдвиг блоков ледового поля* в стороны верхней и нижней поверхностей, особенно ярко это явление происходит при $d/h \approx 1 \sim 3$. Явление сколов (сдвигов) льда порождает *циклическое разрушение льда*, ледовая нагрузка при этом имеет вид пилообразной кривой с пиками и провалами контактной силы.

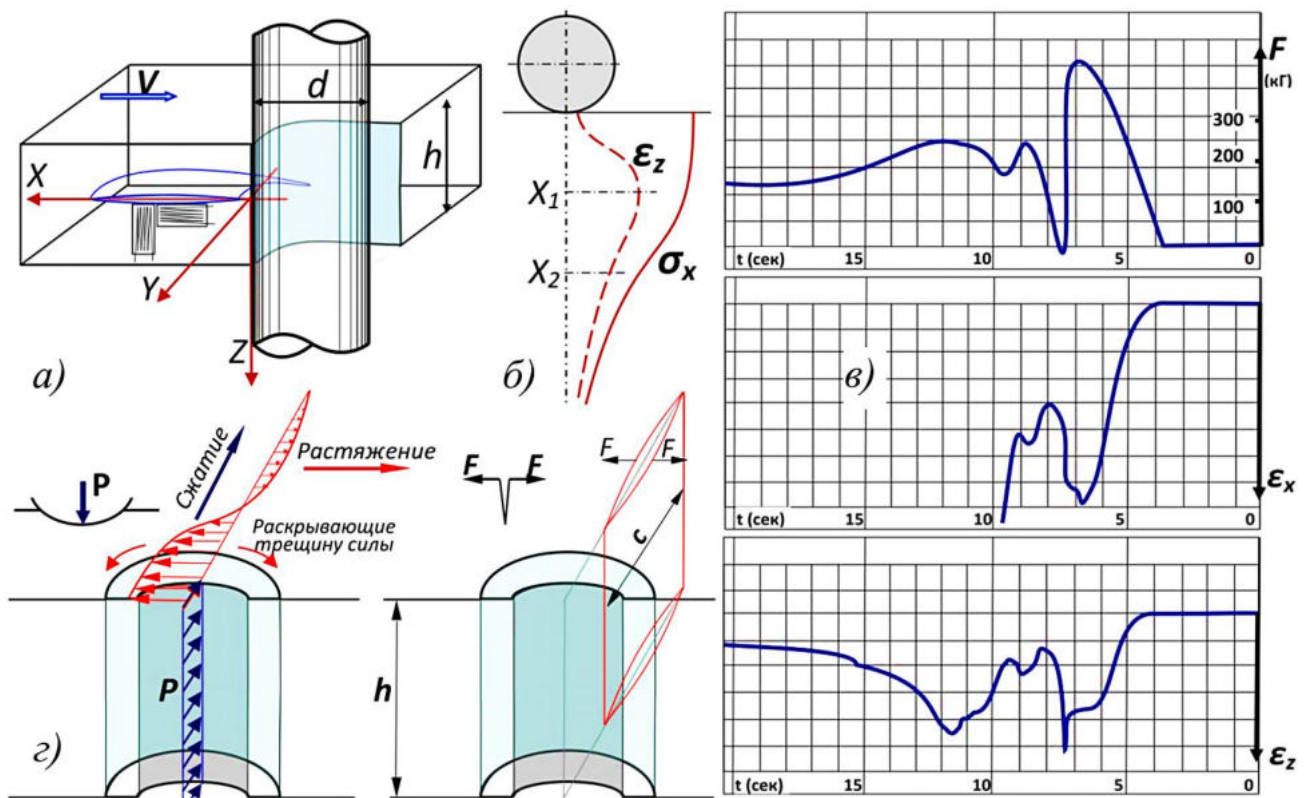


Рисунок 2.2.1 Экспериментально-теоретические обоснования к образованию трещин в ледовой плите: а,б,в) – горизонтальной, расщепляющей ледовую плиту по данным экспериментов Нираюма и др. [26] и г) – вертикальной радиальной по исследованиям Palmer и др. [69]

В 1975 году К. Нираюма с соавторами [26] для малых моделей на искусственном льду в ледовом бассейне выполнили около 30 экспериментов, направленных на исследование природы образования трещин во льду и с этой целью исследовались распределения напряжений во льду перед внедряющейся моделью опоры. В лед, имеющий толщину 1,5 см вмораживались тензодатчики как в направлении движения модели опоры (ось X, рисунок 2.2.1,а), так и в вертикальном поперечном направлении(ось Z). Модель сваи диа-

метром 3,75 см двигалась со скоростью 0,05 см/с, что при данных соотношениях параметров опыта обеспечивало скорость деформирования модельного льда $\dot{\epsilon}=0,08 \text{ с}^{-1}$. Эпюры распределения напряжений показывают (рисунок 2.2.1, б), что в плоскости XOZ на некотором удалении от области гидростатического сжатия ($\sigma_x \sim \text{max}$) перед поверхностью внедряющейся опоры, растягивающие напряжения ($\epsilon_z \sim \text{max}$) достигают пика, что приводит к образованию горизонтальной трещины, расщепляющей плиту льда. Как показывают записи напряжений во льду перед опорой (рисунок 2.2.1, в), развитие горизонтальной трещины разгружает плиту: напряжения в зоне контакта резко падают, следующий цикл разрушения происходит при меньших значениях напряжений. Этот механизм разрушения торцевой грани ледового поля получил подтверждение во многих других исследованиях [43, 47, 59, 59, 84, 83, 100, 102].

Позднее, в работе Palmer с соавторами (1983) [69] была изложена простая теория радиального растрескивания – образования вертикальных радиальных трещин в ледовом поле перед цилиндрической опорой. Эта теория основана на решении Герца для внедрения жесткого цилиндра диаметром D в плоскую вертикальную грань ледовой плиты толщиной h . В случае льда, имеющего модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ , максимальное контактное давление p_m связано с силой P между сооружением и ледяным покровом согласно теории контактного взаимодействия Герца соотношением:

$$p_m = \left[\frac{2PE}{\pi D h (1-\mu^2)} \right]^{0,5}, \quad (2.2.1)$$

Из формулы (2.2.1) следует, что если ширина контакта увеличивается при постоянной толщине льда, создается плоское напряженное состояние в пластине и множитель $(1-\mu^2)$ становится незначимым. Тогда в контактной зоне главные напряжения в объемах массива льда, прилегающим к верхней и нижней поверхностям ледяного покрова как в радиальном (основном) направлении, так и по круговому направлению будут равны p_m . Но в вертикальной плоскости напряжения будут близки к нулю (Frederking и Gold, 1982 [17]). Отсюда следует, что лёд в зоне, прилегающей к поверхности контакта льда со сваей дробится в условиях одноосного сжатия и можно ожидать, что давление при дроблении будет равно $p_m = \sigma_0$. Здесь круговые напряжения не «работают», но на некотором удалении от зоны сжатия, где осевое сжатие уменьшается, эти круговые растягивающие напряжения **вызывают появление вертикальной радиальной плоской трещины** (Рисунок 2.2.1, г).

Разрушение льда в лабораторных экспериментах Frederking R. с соавторами [22, 17] проводившихся в 1982 в ледовом бассейне во всех случаях осуществлялось за счет **дробления**, исключение составляла картина разрушения льда вокруг модели $D = 500$ мм; ледяное поле теряло устойчивость, как сжатая пластинка, причем с увеличением скорости

нагрузки сопротивление льда потере устойчивости постоянно росло. По мнению авторов это происходило за счет увеличения модуля деформации, в то же время с увеличением скорости V различие в значениях коэффициентов смятия для малых и больших диаметров несущественно. В этих случаях может проявляться роль динамических эффектов при взаимодействии льда и опор.

В исследованиях Н. Saeki с соавторами [73,121] по воздействию моделей опор на кромку ледового поля, проводившихся в 1979-1986 г.г. на озере Сарома на Хоккайдо, также как и в опытах группы Вершинина [113], выполнявшихся в ледовом бассейне в Арктическом и Антарктическом Институте в г. Ленинграде, наблюдалось возникновение разрушения льда по механизму типа «скалывания боковых клиньев», т.е. блоков льда треугольной формы. Каждый цикл нагрузки при этом состоит из накопления повреждений в зоне контакта, затем происходит резкий скол блоков льда у нижней и верхней поверхности кромки ледового поля, затем происходит смятие «среднего клина (Рисунок 2.2.2).

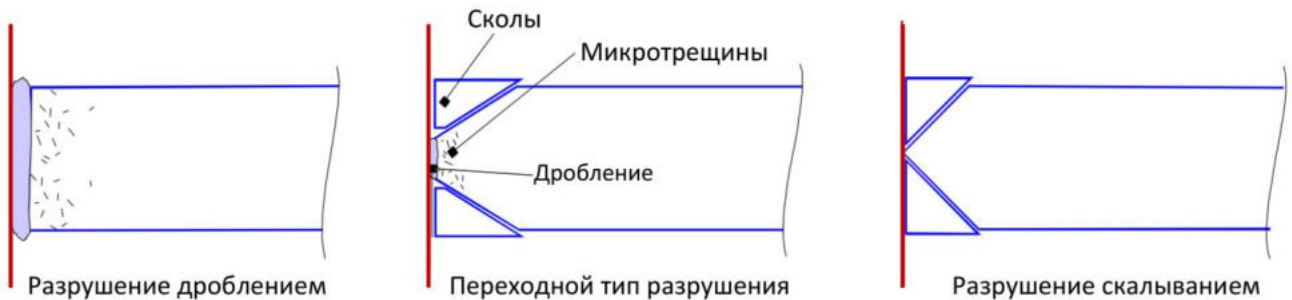


Рисунок 2.2.2 Типы разрушения кромки ледового поля по Н. Saeki с соавторами [121]

Н. Nakajama с соавторами [60] в 1981 исследовали характер разрушений модельного льда в бассейне при протаскивании цилиндрических моделей опор со скоростями от 2 до 20 см/с. При больших скоростях перемещения $V > 10$ см/с ледяное поле перед моделью разрушалось так же, как в натуральных условиях, за счет образования призм скола (Рисунок 2.2.2), без развития горизонтальных трещин. При увеличении диаметра модели и уменьшении скорости перемещения отмечалась тенденция к изменению картины разрушения льда - ледяное поле теряло устойчивость, как сжатая пластинка.

Michel and Blanchet [55] в серии экспериментов 1983 года с различными размерами моделей-инденторов от 0,05 до 1,0 м при варьировании толщины моделированного льда от 1,2 до 9,0 см распределили полученные данные в соответствии с ранее разработанным планом экспериментов и представили результаты в виде схем и описания процесса разрушения льда и ледового поля (Рисунок 2.2.3) в зависимости от соотношения ширины модели и толщины льда в бассейне.

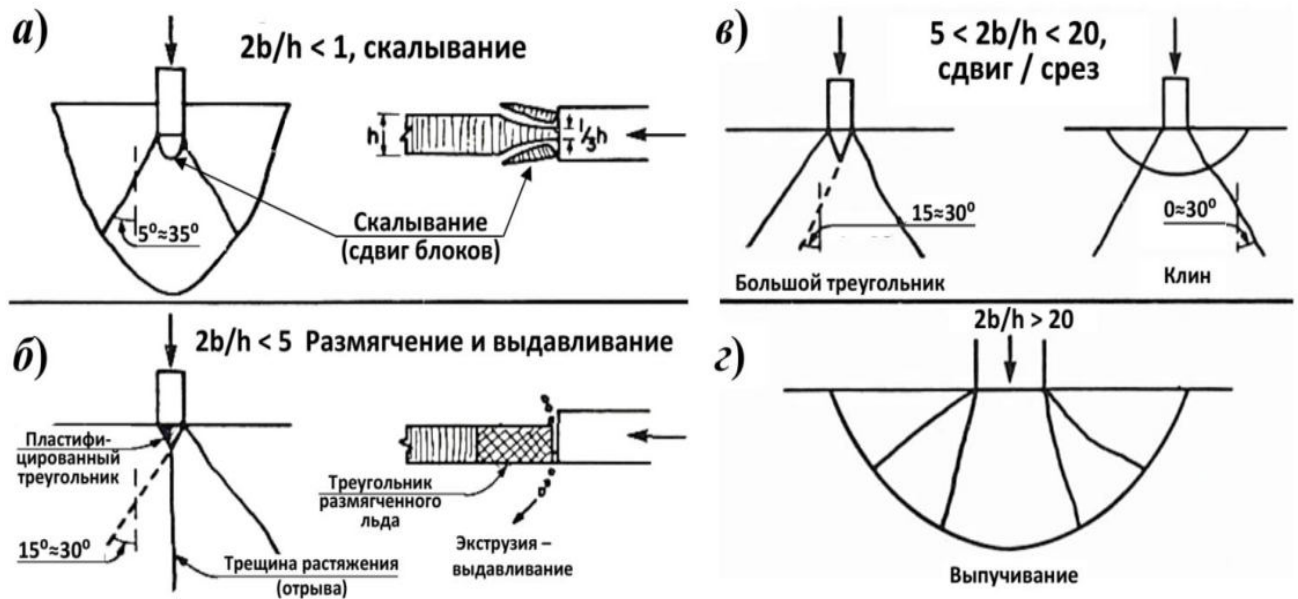


Рисунок 2.2.3 Типы (механизмы) разрушения льда и ледового поля по результатам лабораторных исследований Michel and Blanchet [55]

Из данных этих авторов следует, что разрушение льда при прорезании ледового поля опорой сооружения может происходить по типам, аналогичным наблюдавшимся и другими исследователями [47,56,84], а именно: а) скалыванием; б) раздроблением и в сжатой зоне перед гранью опоры и выдавливанием продуктов разрушения; в) разрушением вершины среднего клина, образовавшегося между радиальными трещинами сдвига; г) выпучиванием части ледового поля в зоне контакта с развитием радиальных и кольцевых трещин.

Sodhi и Morris [58,83,84,86] в 1984 г. предложили идеализированную схему процесса разрушения льда сдвигом блоков льда в сторону свободных нижней и верхней поверхностей, подобную предложенной Вершининым с соавторами [113,115] и Saeki с соавторами [121] (Рисунки 2.2.2). Авторы отмечают, что в данном случае практически вся толщина льда «расходуется» на скол двух призм. Причем, длина сколовшегося обломка составляет третью часть от общей толщины льда. Выводы основаны на результатах обширных лабораторных экспериментов при испытаниях моделей свай на ледовую нагрузку диаметром $50 \div 500$ мм/с при толщинах льда $50 \div 80$ мм и скоростях движения моделей в пределах $10 \div 210$ мм/с.

Во всех опытах С. Morris и D. Sodhi [58] разрушение ледового поля вокруг моделей цилиндрических опор, вне зависимости от их диаметра, носило хрупкий характер также и в результате образования ряда горизонтальных трещин, параллельных поверхности ледового поля. Отмечается, что этот вид разрушения наиболее характерен для случая взаимодействия ледовых полей с опорами большего диаметра, когда лед деформируется в условиях невозможного бокового расширения (стесненное сжатие).

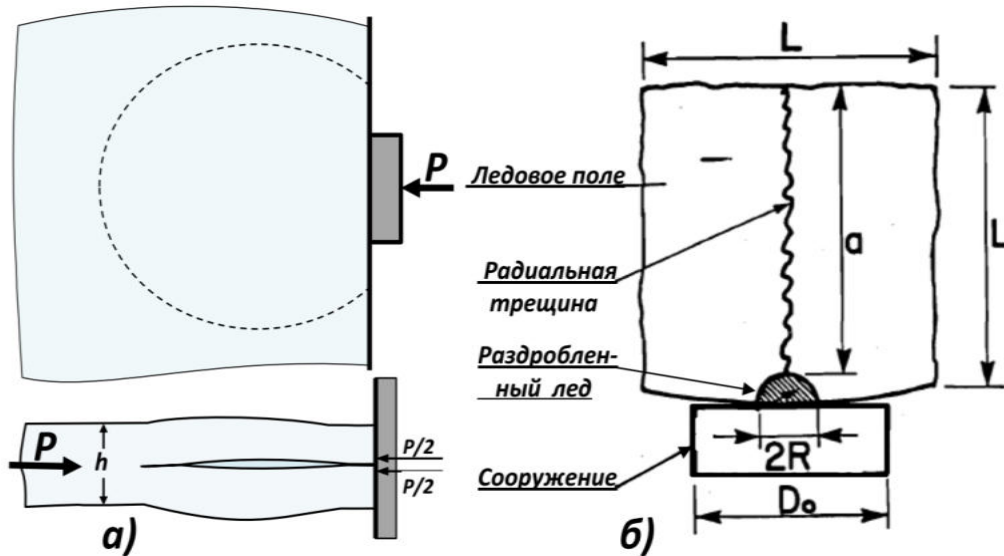


Рисунок 2.2.4 Разрушение грани ледового поля непосредственно перед гранью опоры сооружения и при развитии: а – расщепляющей трещины по Wierzbicki [100] и Wu [102], вертикальной магистральной трещины (б) по Bhat [4] и Wierzbicki [101]

По результатам экспериментальных и теоретических исследований с применением основных положений механики разрушения Т. Wierzbicki [100,101] в 1985-86 г.г. показал возможность разрушения торцевой грани ледового поля на контакте с поверхностью опоры путем развития горизонтальных трещин, «расщепляющих» плиту льда и вертикальной магистральной радиальной трещины, «раскалывающей» ледовое поле (Рисунок 2.2.4). Такие же результаты ранее опубликовали Hirayama и др. [26, 102] для расщепляющей трещины и в 1988 году Bhat [4] – для вертикальной магистральной трещины.

В 1988 году Jordaan и Timco [35] опубликовали результаты специального исследования по механике разрушения льда на контакте торцевой грани ледового поля с поверхностью опоры. Они обосновывали предлагаемую ими модель взаимодействия на явлении непрерывного разрушения льда в виде некоторой области его разрушений, перемещающейся в массиве плиты льда под натиском жесткого индентора впереди его поверхности (Рисунок 2.2.5,а). Позднее такие же картины разрушений модельного льда получили и другие исследователи

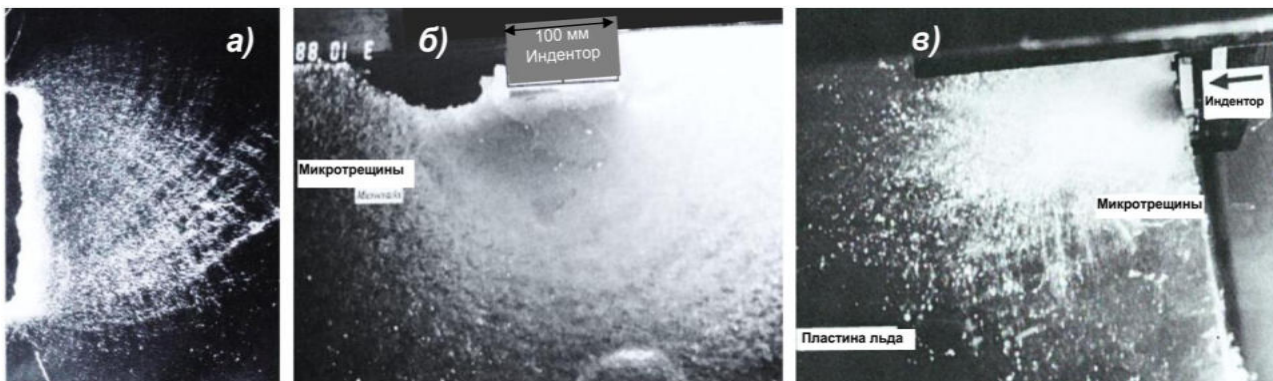


Рисунок 2.2.5 Разрушение грани ледового поля непосредственно перед гранью

опоры сооружения в виде развития зон микрорастрескивания: а) – по Jordaan и Timco [35]; б), в) – по Nakazawa и Sodhi, [61,79]

В опытах Michel and Jolicoeur [56] в 1986 г. выполняли опыты в ледовом бассейне 4 х 4 м со льдом вида S2 соленостью 3-3,5‰, толщиной 2~9см. Плоская модель в опытах имела различную ширину и : $B = 5 \sim 100$ см ($B/h = 0,6 \sim 50,0$). Скорость деформаций соответствовала **вязкому** $\dot{\epsilon} = V/B < 1,5 \cdot 10^{-3}$ 1/с, **полухрупкому** (переходному) $1,5 \cdot 10^{-3} < \dot{\epsilon} < 3 \cdot 10^{-2}$ 1/с, и **хрупкому** разрушению $\dot{\epsilon} < 3 \cdot 10^{-2}$ 1/с.

B/h	< 1	$1 \div 5$	$5 \sim 10$	$10 \div 50$
Значения коэффициента смятия и картина разрушения льда перед моделью опоры	S $K \approx 4$	R.C $K \approx 3$	C.C $K = 1,7 \div 1,5$	Bu $K = 1,5 \div 0,5$

(Рисунок 2.2.6). Характер разрушений льда в зависимости от значений коэффициента интенсивности контактных давления K при различных значениях соотношения B/h по Michel and Jolicoeur [56]

При хрупком и полухрупком разрушении наблюдались четыре вида разрушения льда перед опорой: при $B/h < 1$ – **расслоение S**; $5,1 < B/h < 5$ – **дробление с радиальными трещинами R.C**; при $5 < B/h < 10$ – **призмы скопа C.C**, при $B/h > 10$ – **потеря устойчивости ледяного поля Bu**. По представленным на рисунке 2.2.6 результатам можно проследить процессы развития разрушений льда в зависимости от значений коэффициента интенсивности контактных давления K при различных значениях соотношения B/h . Авторы [56] отмечают, что при вязком разрушении, вне зависимости от D/h , $K \sim 3$.

Изучению многообразия форм разрушения льда перед опорой с целью построения карты форм разрушения, т.е. разделению плоскости $x = D/h$; $y = \dot{\epsilon} = V/2D$ на зоны, в пределах которых наиболее вероятен тот или иной вид разрушения были посвящены исследования Kawasaki [44]. Две серии опытов были им выполнены в 1986 г.:

– на модельном льду толщиной 20~40 мм в ледовом бассейне с плоскими моделями $B = 50; 100; 200$ и 400мм при скорости перемещения моделей $V = 0,2; 2,0$ и 20,0 мм/с (Группа А);

– на стендах с плитами натурального морского льда с о. Хоккайдо с толщинами $h = 40; 100$ и 200 мм и размерами моделей $D = 200; 300$ и 300 мм,двигающихся с теми же скоростями, как и в опытах в бассейне (Группа Б).

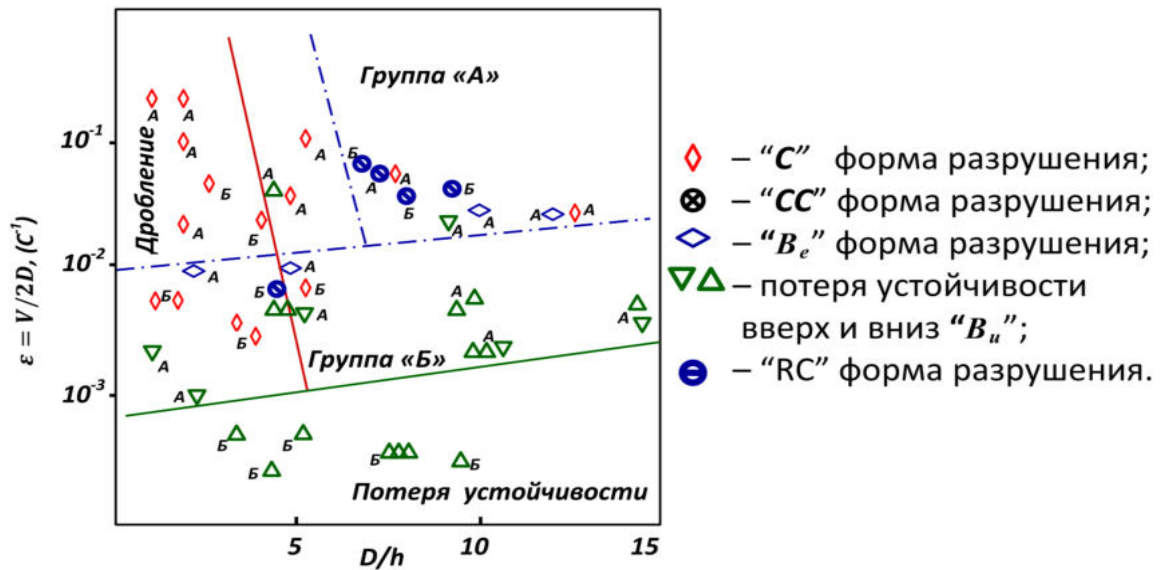


Рисунок 2.2.7 Карта видов разрушения льда перед опорой по Kawasaki [44]

В этих опытах [44], в зависимости от скорости деформации $\dot{\epsilon} = V/2D$ и геометрического параметра D/h было выявлено шесть форм разрушения:

1) дробление (C – форма разрушения); 2) дробление с образованием горизонтальных плоских трещин (S – форма разрушения); 3) дробление с развитием радиальных трещин ($R.C.$ – форма разрушения); 4) дробление с развитием радиальных и кольцевых трещин ($C.C.$ – форма разрушения); 5) потеря устойчивости при ползучести (B_u – форма разрушения); 6) гибкое разрушение (B_e – форма разрушения).

На рисунке 2.2.7 представлена карта форм разрушения для результатов опытов групп А и Б. Как видно из рисунка 2.2.7 для натуральных условий (группа Б) более характерными формами разрушения льда являются S ; $R.C.$ и B_u формы разрушения. Диаграммы записей нагрузок при формах $R.C.$ и B_u имеют характерные участки разрыва.

Практически идентичную рисунку 2.2.7 карту разрушений льда в зависимости от скорости нагружения получил в серии мелкомасштабных экспериментов Timco [93] в 1986 году. Этим автором в серии из 60 опытов пресноводный лед толщиной от 0,6 до 3,3 см в бассейне размерами 21х7х1,2 м прорезался моделями опор шириной $B=2,54 - 12,0$ см при скорости движения нагрузочной каретки $V = 0,1 - 60$ см/с. Автор этих экспериментов [93] пришел к выводу, что давление льда на модели находится в сильной зависимости от отношения B/h . Учитывая малый масштаб моделирования результаты этих экспериментов можно считать скорее качественными, особенно при $B/h > 10$.

Серия фундаментальных лабораторных исследований процессов взаимодействия ледовых полей с шельфовыми сооружениями проводились в период с ноября 1989 года по февраль 1990 года в ледяном бассейне Центра технических исследований Финляндии [39,59] в небольшом ледовом бассейне VTT/RAT площадью 3х15 м². Плавающее поле

моделированного толстого пресноводного льда столбчатого строения нагружалось внедряющимся горизонтально индентором. В ходе экспериментов изменялись: форма и ширина инденторов (в т. ч. плоские и цилиндрические вертикальные профили шириной от 100 до 900 мм); скорость вдавливания (10, 30, 50 и 80 мм/сек);, толщина льда от 50 до 130 мм; собственная частота модели сооружения 1,9; 4,1 и 25 гц.

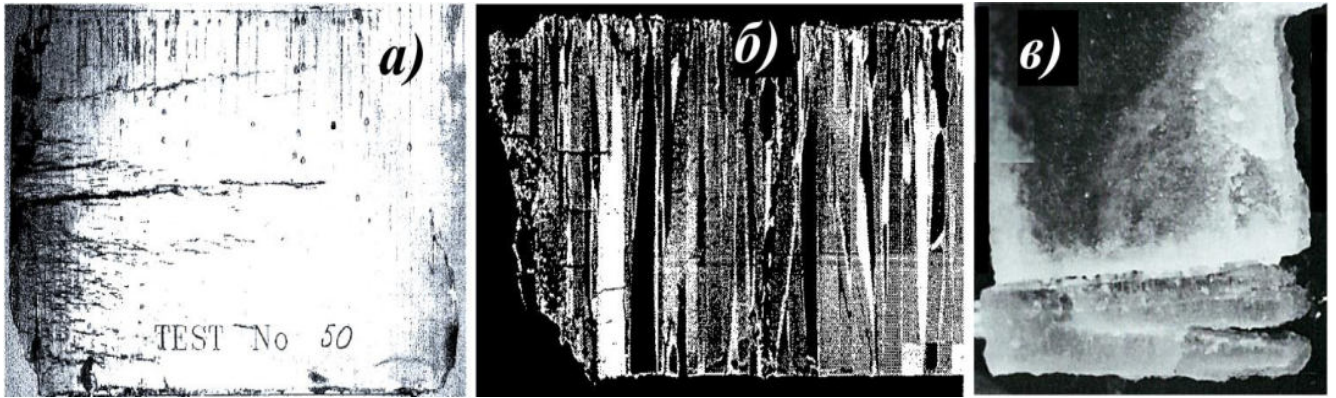


Рисунок 2.2.8 Разрушения модельного льда перед опорой горизонтальными трещинами: а) – по Muhonen et al. [39,59]; б) – по Kamesaki et al. [37, 38] и по Nakazawa и Sodhi [61]

Было проведено 77 испытаний, 45 из которых с вертикальными гранями индентора. На рисунке 2.2.8,а показана фотография тонкого вертикального среза искусственного пресного льда в месте контакта с поверхностью модели опоры, где отчетливо видны ряд параллельных горизонтальных трещин. На этом же рисунке справа (б) приведена подобная фотография разрушения морского льда столбчатой структуры по исследованиям Kamesaki с соавторами [37, 38], выполненные в 1996-99 г.г. при вертикальном приложении нагрузки от модели на торцевую грань ледового блока. Здесь также наблюдаются короткие горизонтальные трещины.

Эксперименты по широкой программе исследований явлений разрушений льда на контакте с моделями опор в 1990-1991 г.г. были проведены исследователями Nakazawa, Sodhi и др. [61,79] в Отделе изучения льда лаборатории инженерных исследований холодных регионов армии США.

Использовались инденторы шириной 50, 60, 100 и 150 мм, толщиной льда варьировалась от 20 до 60 мм, скоростью индентора варьировалась от 1 до 9 мм / с. Во время каждого теста измерялись сила, создаваемая внедряющимся в лед индентором, давление льда на границе лед – индентор, смещение индентора относительно ледяного покрова, смещение каретки относительно фиксированной базы и активность акустической эмиссии (АЭ) во льду. В этих опытах авторами наблюдались все типы разрушения льда на контакте с опорой сооружения.

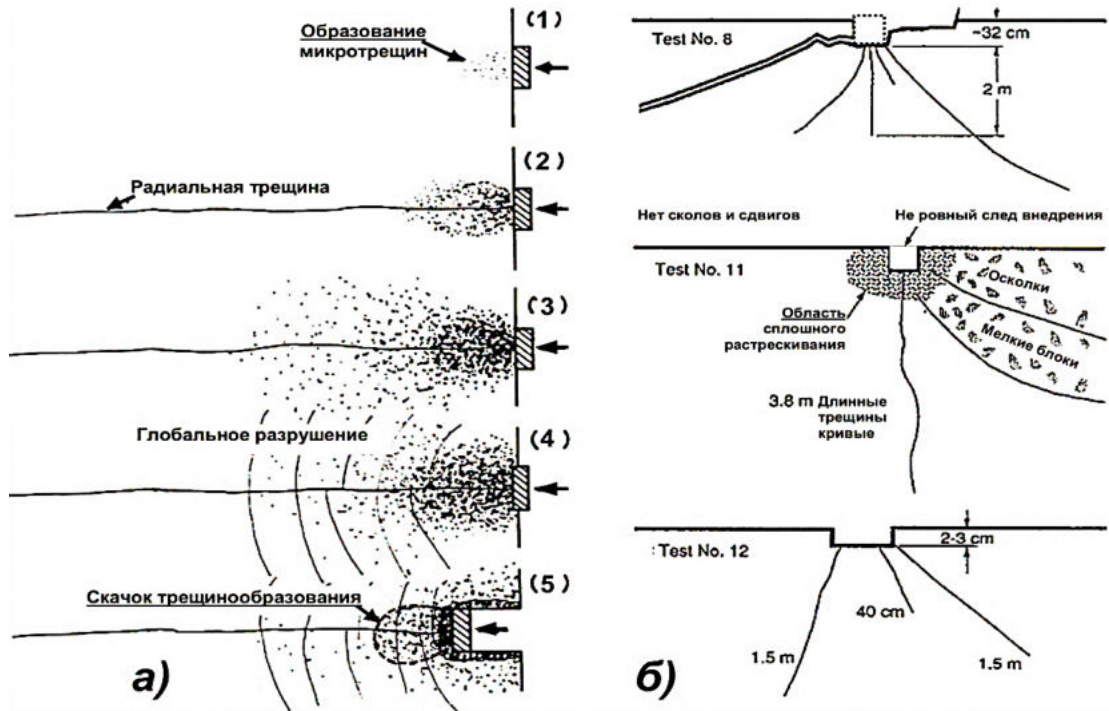


Рисунок 2.2.9 Разрушения льда перед опорой вертикальными трещинами:

а) – по Nakazawa и Sodhi [61] и по Sodhi [79]

На рисунке 2.2.9, б-в и 2.2.9, в. приведены фотографии первой и последующих фаз разрушения грани ледового поля непосредственно перед поверхностью опоры в виде развития зон микрорастрескивания и образования горизонтальных трещин, расщепляющих плиту льда. Кроме того, авторами в этих экспериментах [61] с помощью маркеров, с использованием фотографирования и видеосъемки для записи всех процессов в эксперименте было зафиксировано важное событие – зарождение первой радиальной трещины (Рисунок 2.2.9,а). В работе [79] на этом же оборудовании были выполнены исследования по зарождению и развитию вертикальных трещин перед плоской гранью модели опоры (Рисунок 2.2.9,б).

Эксперименты, по разрушению торцевых граней специально подготовленных блоков льда, устанавливаемых вертикально (Рис. 2.2.10), были выполнены в 1993-1995 г.г. Т. Tuhkuri [98]. Лед для образцов, используемый в этой программе, был выращен в лабораторном резервуаре и в природном пресном водохранилище и имел столбчатую структуру типа S2 с размером зерна 6 мм.

На рисунке 2.2.10 показаны схема экспериментальной установки и размеры и формы ледяных блоков, а также используемые ориентации зерен. Использовались две разные ширины образца: 120 мм и 60 мм. Длина образца составляла 320 мм, а начальная высота – около 200 мм. Верхние поверхности образцов льда имели клиновидную форму с углом цитры 120° или 90°. В одном из испытаний использовался угол 180°. т. е. испытательная плита была нагружена плоской поверхностью льда..

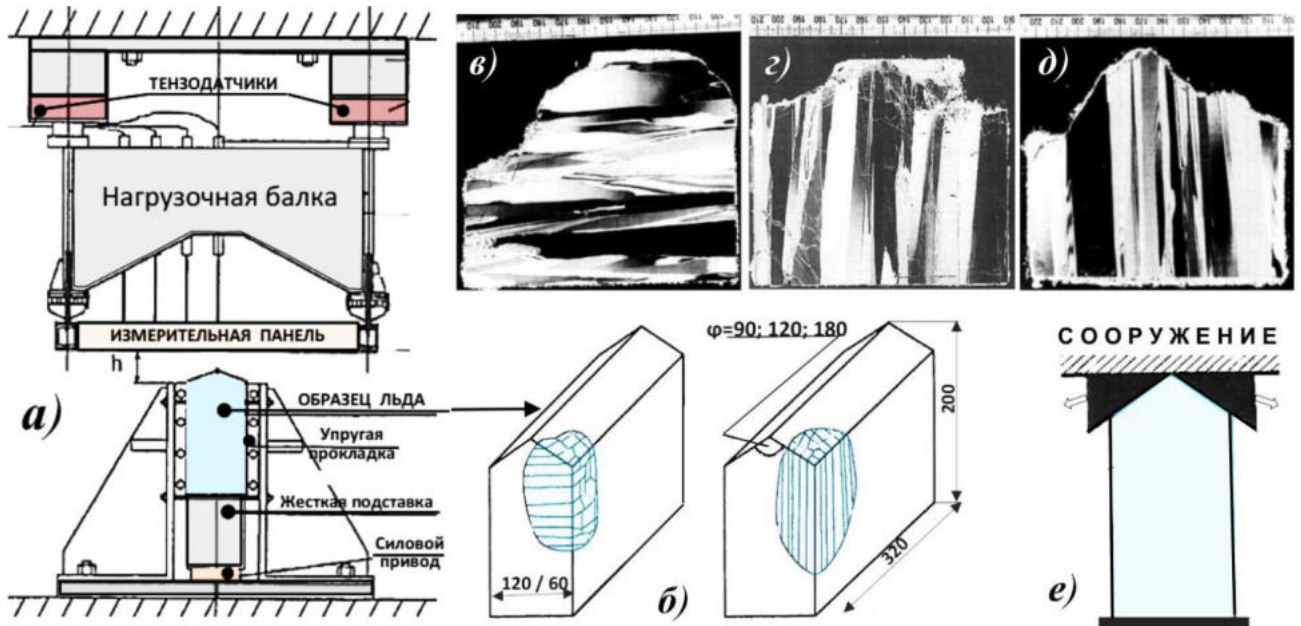


Рисунок 2.2.10 Эксперименты по разрушению натурального льда на лабораторной установке вертикального типа по Tuhkuri [98]

Во время каждого эксперимента примерно половина высоты образца подвергалась разрушению при вертикальном движении привода, перемещавшегося вверх с постоянной скоростью 1; 10; 20 и 50 мм/с. Наивысшая скорость использовавшегося привода была 50 мм/сек, а наименьшая – 1 мм/сек, что приводило к продолжительности испытаний от 2 до 100 сек.

Эксперименты, подобные экспериментам Т. Tuhkuri [98] в 1995 г. выполнены Kamesaki с соавторами [37, 38], при разрушении торцевых граней специально подготовленных блоков льда, устанавливаемых также вертикально. Данные исследования показали превалирование в процессе взаимодействия модели опоры с образцами-пластинами льда механизма скалывания льда (Рисунок 2.2.11).

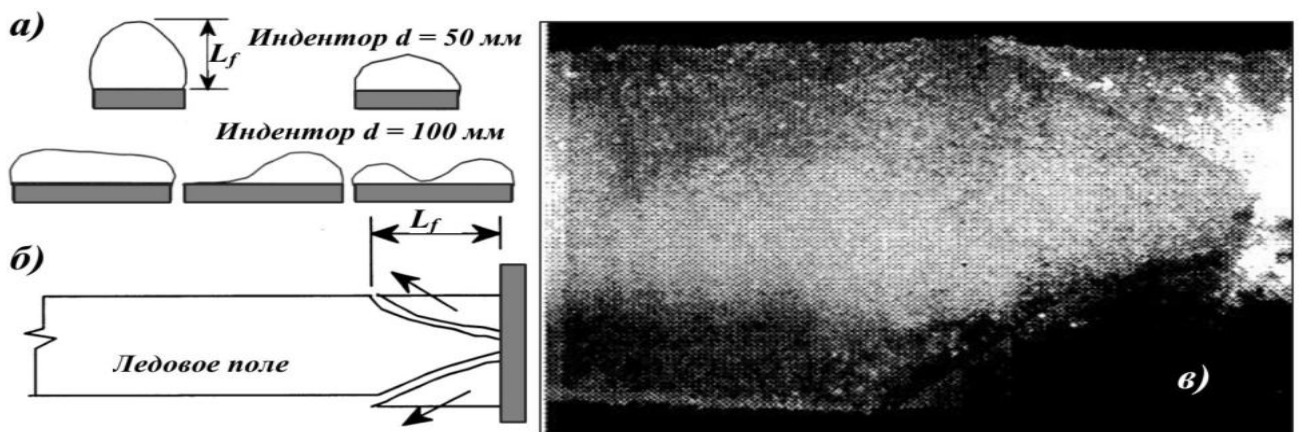


Рисунок 2.2.11 Опыты по разрушению натурального льда на лабораторной установке вертикального типа по Kamesaki с соавторами [37, 38]

Для экспериментальных исследований процессов разрушения льда при взаимодействии с моделями опор сооружений шириной 50 и 100 мм, перемещающихся со скоростями 5; 10; 16,7 мм/сек, была изготовлена специально спроектированная установка, позволяющая моделировать податливость опоры сооружения. Но, на самом деле, именно пластина льда, помещенная в специальную массивную опору, имела возможность изменять свою жесткость, так как была подвешена на пружины (рисунок 2.2.2.XX). Испытаниям подвергался лед в виде выпиленных из замороженных пластин образцов с толщиной от 36 до 62 мм. Важным результатом экспериментов было наблюдение, показывающее зависимость длины скалывающегося «клина» льда от податливости опоры и скорости нагружения льда: величина L_f (рис. 2.2.11) увеличивается с увеличением податливости модели опоры и уменьшается с увеличением скорости внедрения.

В течение почти пятидесятилетнего периода лабораторных исследований процессов взаимодействия моделей опор сооружений как с моделированным, так и со льдом природного намерзания было выполнено большое количество экспериментов, одним из главных результатов которых было понимание полной картины разрушений льда в зоне его контакта с поверхностью внедряющегося индентора – модели опоры (Рисунок 2.2.12).

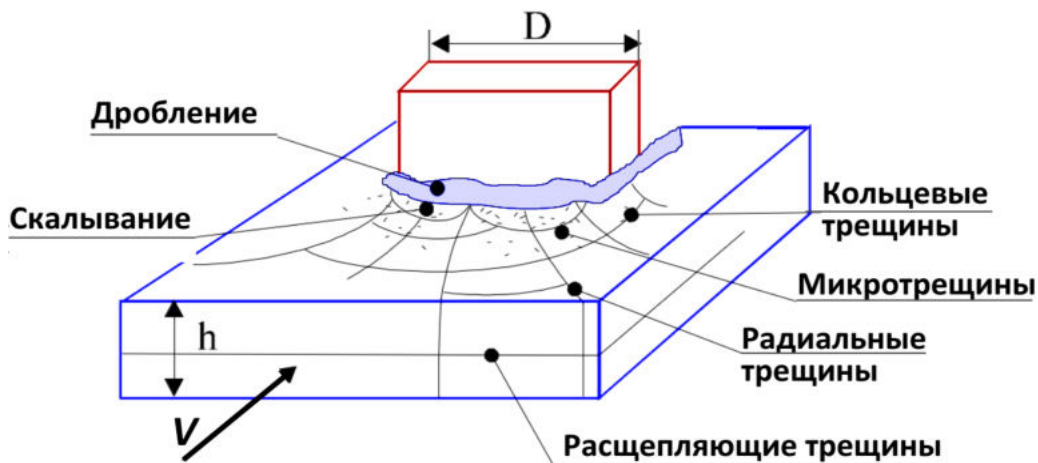


Рисунок 2.2.12 Карта разрушений льда на торцевой грани ледового поля по исследованиям различных авторов

Такая картина возможных разрушений торцевой грани ледового поля складывалась как из результатов отдельных исследований, так и из данных комплексных исследований и она в разные годы представлялась многими авторами, такими как, например, Коржавин (1962) – [118]; Вершинин с соавторами (1973-75) – [113,115]; Hirayama, Schwarz и Wu (1973-75) – [25,26,77] Цуприк (1979-80) – [122, 125]; Saeki с соавторами (1983) – [121]; Michel, Blanchet и Jolicoeur (1983-86) – [55,56]; Sodhi и Morris (1984-86) – [58,83,84,86]; Wierzbicki (1985-86) – [100,101]; Kawasaki (1986) – [44]; Jordaan и Timco (1986-88) – [35,93]; Sanderson (1988) – [75]; Nakazawa и Sodhi с соавторами (1990-92) – [61]; Kärnä с соавторами (1990-99) – [39–42,59]; Sodhi (1992) – [79,82]; Tuhkuri (1995) – [98]; Kamesaki

с соавторами (1995) – [37, 38]; Palmer с соавторами (1996) – [69] и др.; Karulin соавторами [43].

2.2.2 Исследования влияния стеснения в зоне контакта индентора со льдом

Исследования влияния стеснения в зоне контакта индентора со льдом (соотношения B/h) на значения контактного давления льда и характер его разрушения проводились во всех известных работах. Необходимость получения таких данных была обоснована опубликованными в 1971 г.г. результатами первых экспериментов В.П. Афанасьева с соавторами [111] по взаимодействию моделей опор с модельным льдом в первом ледовом бассейне ААНИИ. Оказалось, что усилие, действующее на опору при движении ледового поля, а также *характер разрушения в большой степени зависят не только от основных факторов – прочности льда R_c , площади контакта $S=B \cdot h$ и скорости ледовой плиты V , – но и от относительных размеров опоры и толщины льда B/h или D/h ¹. Это соотношение получило название, данное К.Н. Коржавиным как «**коэффициент смятия $K_{см}$** », который определяет увеличение контактного давления льда толщиной h на вертикальную опору диаметром D с учетом масштабного эффекта и влияния гидростатического обжатия за счет пространственного напряженно-деформированного состояния ледяного поля вокруг опоры. Этот коэффициент является определяющим в методике расчета и его определению уделено наибольшее внимание. Определение численных значений величины $K_{см}$ проводилось экспериментально многими исследователями как в ледовых бассейнах на модельном и натурном льду, так и в натуральных условиях испытаниями прорезания морского или озерного ледового покрова.*

Впервые опытному изучению этого феномена для льда в середине прошлого века были посвящены исследования **К.Н. Коржавина** [118] (1961), который провел серию специальных экспериментов по внедрению пуансона в призматические образцы пресноводного льда (Рис. 2.2.13). Для учета этой особенности Коржавин [118] ввел в расчетную формулу ледовой нагрузки «коэффициент условий пространственно-напряженной работы» ледяного поля вокруг сооружения, названный им как «**коэффициент смятия**» льда $K_{см}$. По результатам 199 испытаний больших призм на вдавливание автором этих исследований получено значение $K_{см}$ в пределах от 1,0 до 2,5 в зависимости от соотношения b/h — при

¹ Здесь и далее разные авторы обозначают ширину сооружения по-разному: как d , D , b , B или $2b$, иногда W).

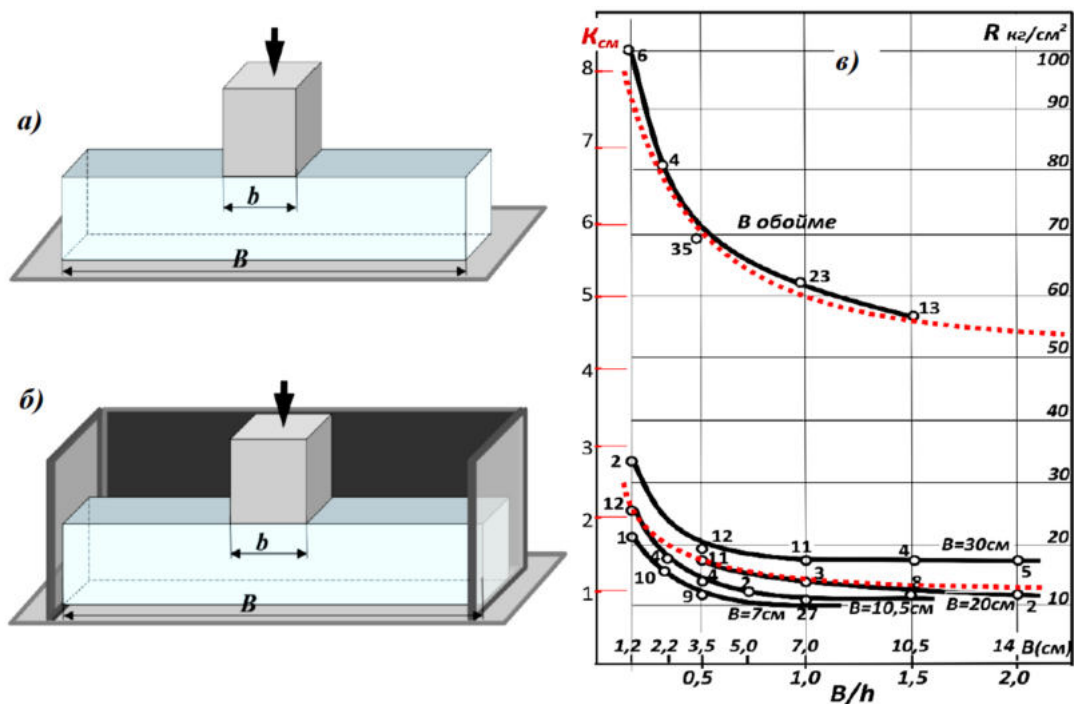
свободных боковых гранях испытываемых призм льда. Для условий испытаний ледяных призм, заключенных в обойму были получены значения коэффициента смятия были намного выше: $K_{см.} \approx 8,5$ (Рисунок 2.2.13,в).

Для вычисления коэффициента смятия Коржавин [118] предложил использовать известную из других приложений этой известной плоской задачи формулу

$$R_{см.} = R_0 \cdot \sqrt[3]{b/B}. \quad (2.2.2)$$

Характер разрушения призм в опытах Коржавина [118] сильно отличался в зависимости от условий испытаний: при свободных гранях брусков льда «их боковые части не подвергались разрушению, в то время как весь образец прорезался рядом трещин». Это свидетельствует о сложном напряженном состоянии льда во втором случае.

Параллельно с лабораторными экспериментами в ААНИИ [111] по прорезанию моделями опор сооружений модельного льда, институтом ВНИПИморнефтегаз по договору с СахалиНИПИМорнефть в 1972 г. (С. А. Вершинин с соавторами [115]) были проведены эксперименты в натурных условиях на морском льду залива Уркт на северном Сахалине (Рис.2.2.14). Испытания выполнялись на моделях «малого диаметра» (0,3-0,6 м)



при прорезании льда толщиной 1,0 м.

Рисунок 2.2.13 Данные экспериментов Коржавина [118] по определению коэффициентов смятия льда $K_{см}$: а,б) – иллюстрация метода испытаний без обоймы и в обойме; в) – графики для $K_{см}$ для испытаний призм

На графике рис. 2.2.15,а помещены данные натурных экспериментов [115], хорошо

согласующиеся с данными экспериментов коллектива авторов [113] в ледовом бассейне. На этот график нами нанесены результаты исследований Коржавина [118], полученные им для условий внедрения в грани брусков льда при ограничении их бокового расширения.

Очевидно, что результаты исследований в ледовом бассейне и в натурных условиях на Сахалине [115] для исследований $K_{см}$ в условиях прорезания пластины льда моделью опоры полностью совпадают с данными Коржавина [118]. По результатам проведенных в том же ледовом бассейне исследований параметров прорезания поля модельного льда моделью опоры сооружения Афанасьевым с соавторами [111], дали результаты, согласующиеся с результатами Коржавина:

$$K_{см.} = \sqrt{(5 h/B + 1)} . \quad (2.2.2)$$

Здесь отмечается также, что при значениях $B/h = 2 \sim 4$ наблюдается прорезание льда опорой, при $B/h = 4 \sim 7$ – разрушение 2-х видов, при $B/h > 7$ ледовое поле разрушается от потери устойчивости и изгиба.

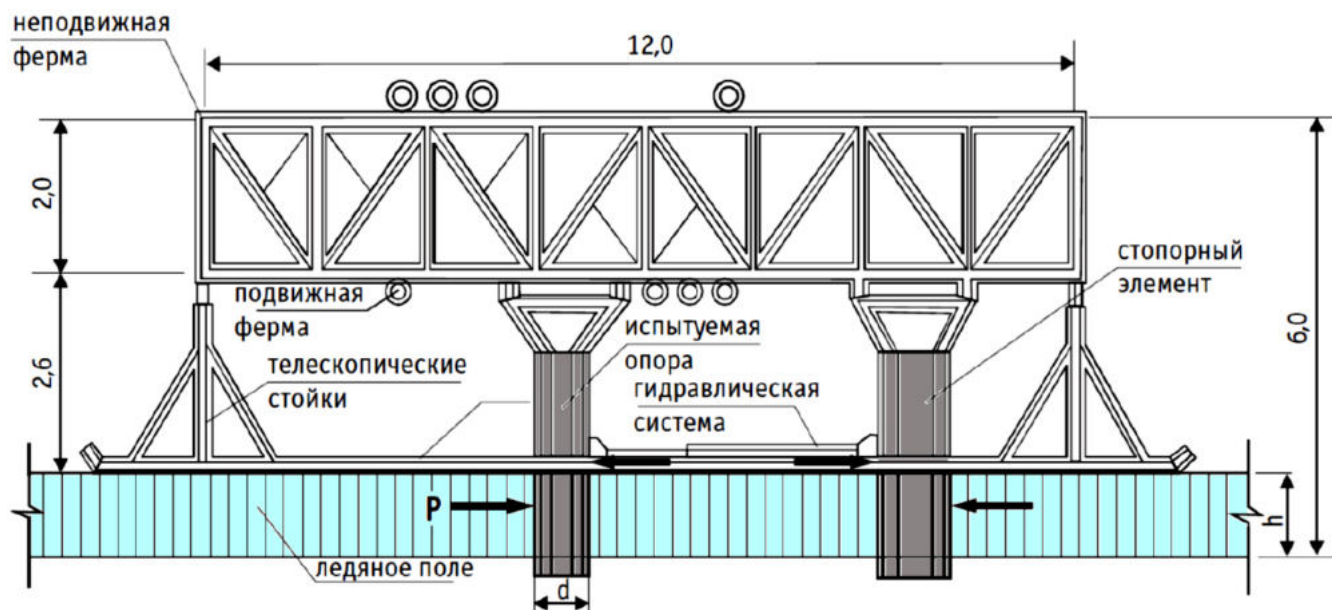


Рисунок 2.2.14 Экспериментальная установка для прорезания натурального льда (1,0 м) моделями опор малого диаметра (0,3-0,6 м) и определения контактных сил, изучения характера разрушения льда и определения $K_{см}$ (по [114,115])

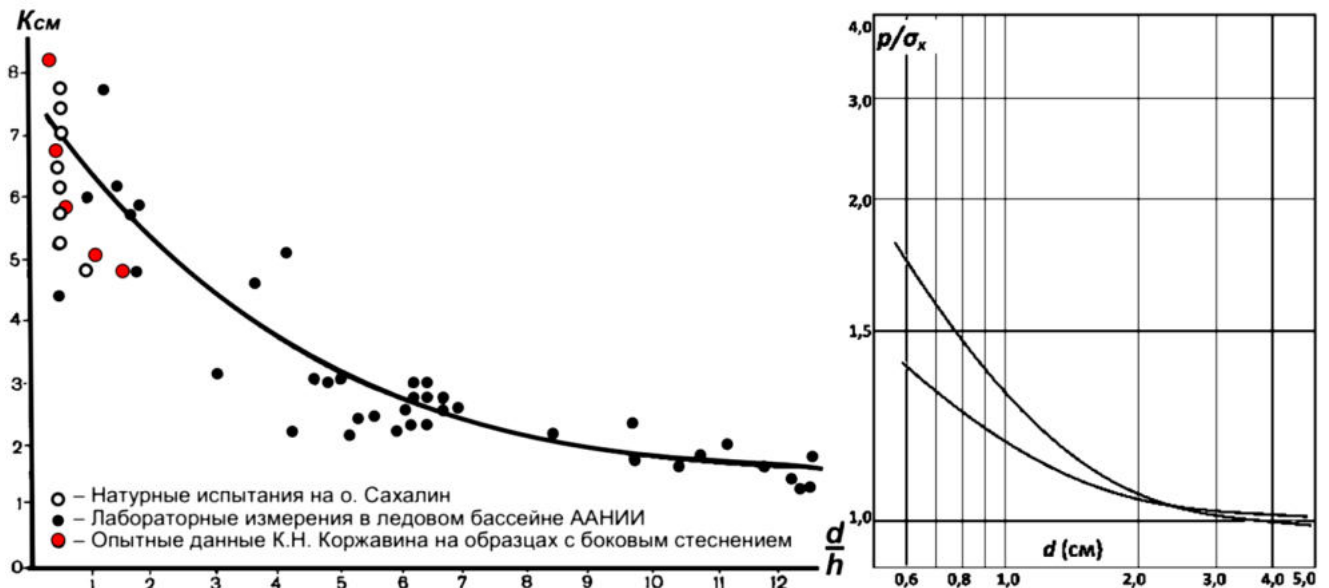


Рисунок 2.2.15 Коэффициент смятия льда в зоне контакта грани ледового поля с опорой: а) – по Вершинину с соавторами [113] и по Коржавину [118]; б) – по Hirayama с соавторами [26]

Одними из первых экспериментально-теоретических исследований контактных явлений при взаимодействии сооружения с дрейфующим ледовым полем были исследования группы Hirayama с соавторами [26], выполненные в 1970-75 г.г. Эти исследователи ввели понятие «**механизм разрушения льда**», исследовали влияние на давления, возникающие на контактной поверхности опоры и льда **ширины и формы опоры** (рисунок 2.2.15,б), а также **скорости деформации льда $\dot{\epsilon}$**

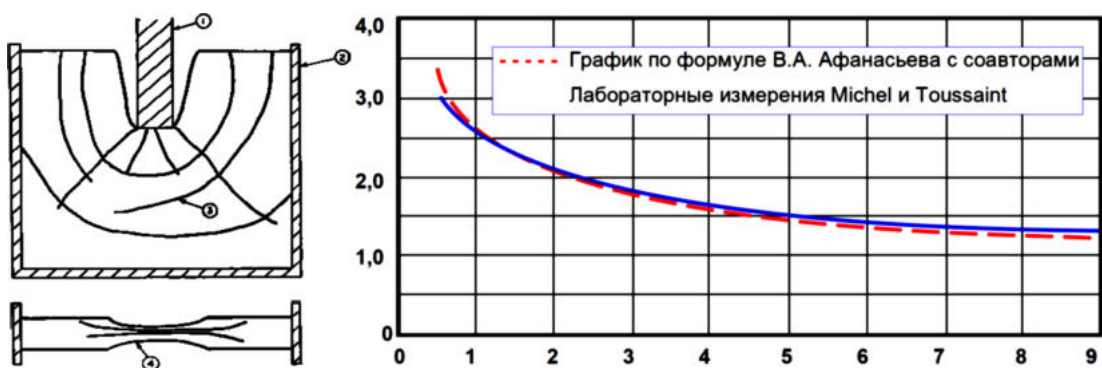


Рисунок 2.2.16 Вид разрушения пластины льда в обойме (а) при прорезании индентором по [57] и (б) – график для коэффициента смятия K_{cm} – (d/h) в сравнении с графиком по формуле Афанасьева с соавторами [111]

Весьма значимую работу представили Michel и Toussaint [57] в 1977 г. Метод испытания в рассматриваемом исследовании отличался от опытов Коржавина К.Н. тем, что штамп – прямоугольная модель шириной от 0,6 до 20 см *продавливался гидравлическим*

прессом с различной скоростью в кромку ледяной плиты размером 81х 81 см и толщиной 2,5 – 10 см (структура S2, средний размер кристалла 7,5 мм), заключенной в жесткую обойму (Рисунок 2.2.4,а).

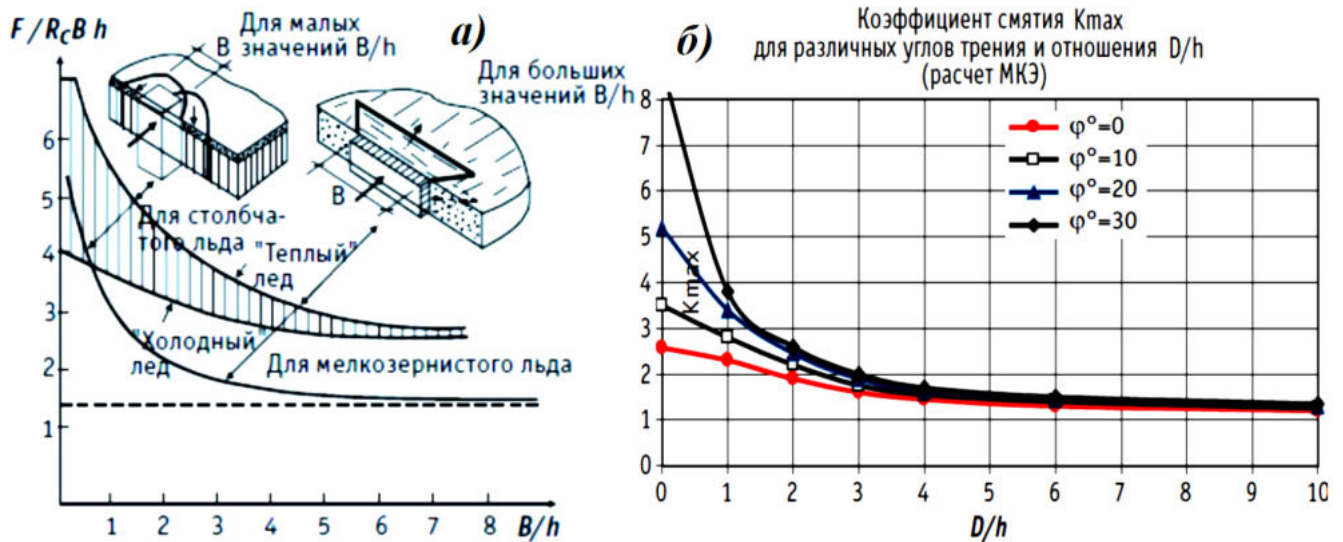


Рисунок 2.2.17 Графики, иллюстрирующие изменения коэффициента смятия $K_{см}$ при изменениях отношения D/h : а) - аналитические решения по [6,11]; б) - численное решение методом конечных элементов для различных значений угла внутреннего трения $\varphi = 0^\circ \div 30^\circ$ по [115]

В общем, учитывая высокую важность эффекта влияния данного явления на расчетное значение ледовой нагрузки, рассматриваемому в этом разделе вопросу, кроме показанных здесь, посвятили свои исследования также [6,11,17,26,44,47,55,56,57,58,60,62,63,64,73,76,83,84,86,93,121] и ряд других. Данное явление изучалось также аналитически [6,11] и численно – методом конечных элементов [115], Рис. 2.2.17, результаты расчетов совпадают с данными многочисленных опытов.

Результатом приведенного (не исчерпывающего полный список работ) обзора исследований явления «разрушения льда в условиях стеснения» в зоне контакта индентора со льдом **и влиянию такого стеснения на значения контактного давления льда и на характер разрушения льда в зоне контакта следует считать однозначное подтверждение существования исследуемого явления.**

Это явление авторы, опираясь на общие положения теории упругости, объяснили тем, что при относительно узких опорах за счет боковых, не подвергающихся непосредственному разрушению участков льда, но препятствующих боковому расширению льда в сжатой зоне перед опорой при ее внедрении в кромку ледового поля, в этой зоне создается сложное напряженное состояние (двухосное и трехосное сжатие), увеличивающее сопротивление льда разрушению. Основной результат многих таких наблюдений: при постоянной толщине льда удельное **контактное давление льда на опоре большего диаметра**

снижается.

На основании данных этого обзора степень влияния рассматриваемого «фактора D/H » на результаты расчета ледовой нагрузки на сооружение можно представить достаточно полно в виде представленной на рисунке 2.2.18 диаграммы–схемы из работ Blanchet и DeFranco [6,11], иллюстрирующей переход напряженно-деформированного состояния льда в торцевой грани ледового поля от одноосного (свободного) до трехосного (сложного).

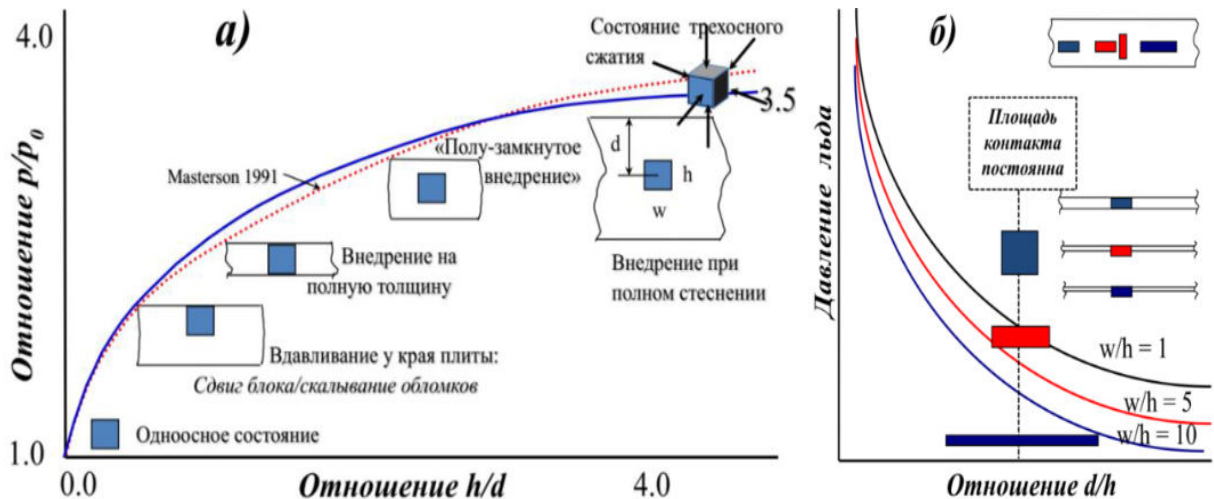


Рисунок 2.2.18 Диаграмма, иллюстрирующая переход напряженно-деформированного состояния льда от одноосного до трехосного (а) и вид графиков коэффициентов смятия $K_{см}$ (б) по Blanchet и DeFranco [11]

Таким образом, «коэффициент стеснения» или коэффициент изменения значений контактных напряжений от параметра D/h рисунке 2.2.18,б определяет, в первую очередь вид напряженно-деформированного состояния льда и должен учитываться в зависимости от наличия сети трещин, нарушающих сплошность массива льда в зоне его контакта с сооружением.

2.2.3 Исследования влияния формы опоры на изменения значений контактного давления

Такие исследования выполняли многие экспериментаторы, изучавшие явление взаимодействия ледовых полей с опорами сооружений как в ледовых бассейнах, так и на натурном льду с использованием соответствующих моделей. Так, в течение нескольких зимних сезонов 1977-1983 г.г. японские ученые Н. Saeki, с соавторами [73, 121] на искусственном соленом льду на озере Сарома на Хоккайдо провели серию экспериментов на специальном стенде (Рис. 2.2.19,а) по изучению отношения D/h на значения контактных

давлений на опоры различной формы. На стенде испытывались модели цилиндрической, квадратной и прямоугольной форм диаметром $D = 3 - 15$ см и шириной $B = 3 - 15$ см и $B = 2,8 - 14,1$ см в зависимости от ориентации квадратного сечения опоры относительно направления движения ($\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$). Толщина льда изменялась от 3 до 15 см. Соленость льда изменялась от 4 до 6,5%. Размер кристаллов льда 1–2 мм, температура льда $-2^\circ\text{C} \sim 7^\circ\text{C}$. Прочность на одноосное сжатие изменялась в пределах 2,0 – 4,0 МПа. Эмпирическая формула для определения давления льда на опору, построенная по результатам экспериментов представлена в виде:

$$F = C \cdot \sqrt{B} \cdot h \cdot R_c, \quad (2.2.3)$$

Где C – коэффициент, равный 5,0 см для цилиндра; 6,8 – для квадратного сечения при $\alpha = 0^\circ$ и 4,5 – для квадратного сечения при $\alpha = 45^\circ$.

В результате исследований Saeki Н. с соавторами [73,121] был подтвержден не только факт снижения номинального значения контактных напряжений при разрушении льда с ростом параметра D/h (Рис. 2.2.19,б), но ими также было установлено значение коэффициента C , учитывающего масштабный эффект и конфигурацию опоры в плане.

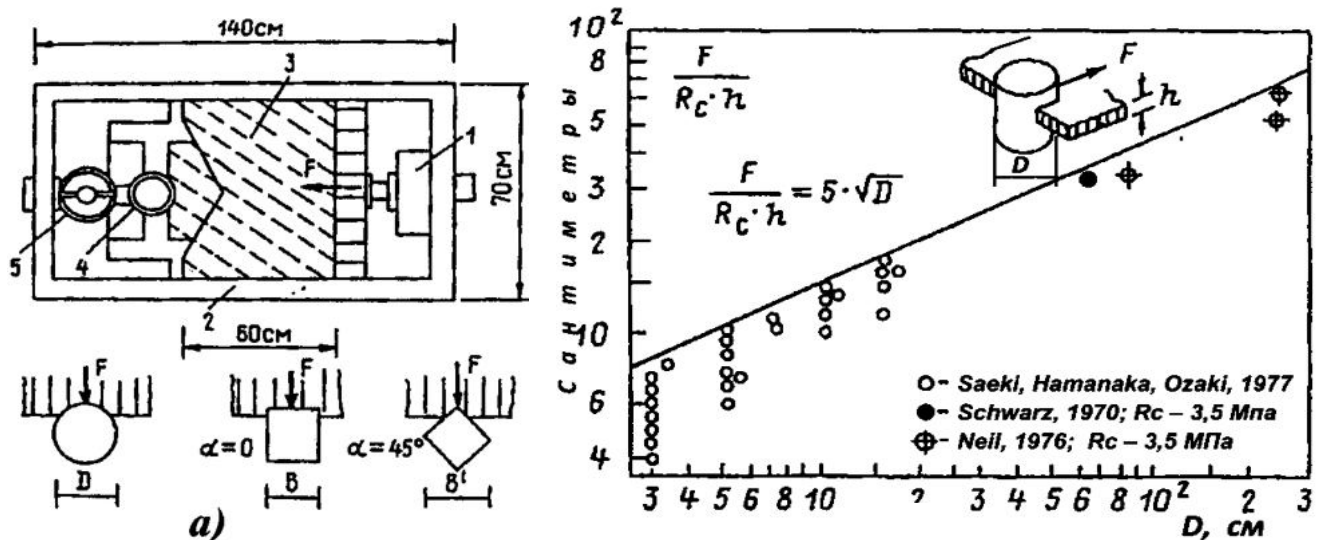


Рисунок 2.2.19– Исследования контактного давления Saeki с соавторами [73] на модельном льду: а) –стенд для моделирования контактных явлений; б) – пример результатов испытаний для цилиндрических моделей в сравнении с данными для речных мостовых опор других авторов по [63] и [76]

Подобные результаты также были получены в работах I. Schwarz [76] и G.R.Neil [63] Формула, аналогичная (2.2.3) была получена в работе К. Hirayama с соавторами [26] для малых моделей диаметром в несколько сантиметров, но здесь $C = 3,57^{0,5}$ см и $h^{-1,1}$ вместо

h. Из формулы (2.2.3) следует, что безразмерный коэффициент смятия

$$K = \frac{E}{Rc \cdot B \cdot h} = \frac{C}{\sqrt{B}} = C \cdot \left(\frac{B}{h}\right)^{-0,5} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{h}}\right) \quad (2.2.4)$$

стремится к бесконечно большой величине при $B \rightarrow 0$. Но при больших значениях ширины опоры B стремится к нулю, и это потому, что параметр C не является физической величиной, также как и не является константой, и его значение зависит от соотношения геометрических параметров B/h . В тоже время, согласно формуле (2.2.4) коэффициент смятия K при фиксированном значении B/h изменяется как гипербола в зависимости от $1/h$, что не имеет достаточного экспериментального подтверждения. Формула (2.2.4) получена без анализа теории размерности основных физических параметров и справедлива лишь в узком диапазоне изменения B и h .

Эксперименты в такой же постановке были выполнены в работе Nevel D.E. Perham [64]. На рисунке 2.2.20 представлены результаты проведенных в 1977 г. 60 опытов с моделями круглых, плоских опор и опор с углом заострения 90° и 45° , шириной (диаметром) 3,8 - 92,0 см при толщине соленоводного льда 7,5-20 см (средняя соленость (6-11 ‰) и температуре льда (осредненной) 2,5-4,0° С.

Важный результат: картина разрушения льда зависела от формы опоры, соотношения B/h и скорости деформирования $\dot{\epsilon}$. При этом, при изменении скорости нагружения от 2,5 до 50 см/сек **не вызвали существенного изменения скорости на результаты опытов**, в то время как для плоской опоры показали **снижение давления льда на опору с 2,5 до 0,6 Мпа** при изменении скорости от 0,25 до 45 см/с.

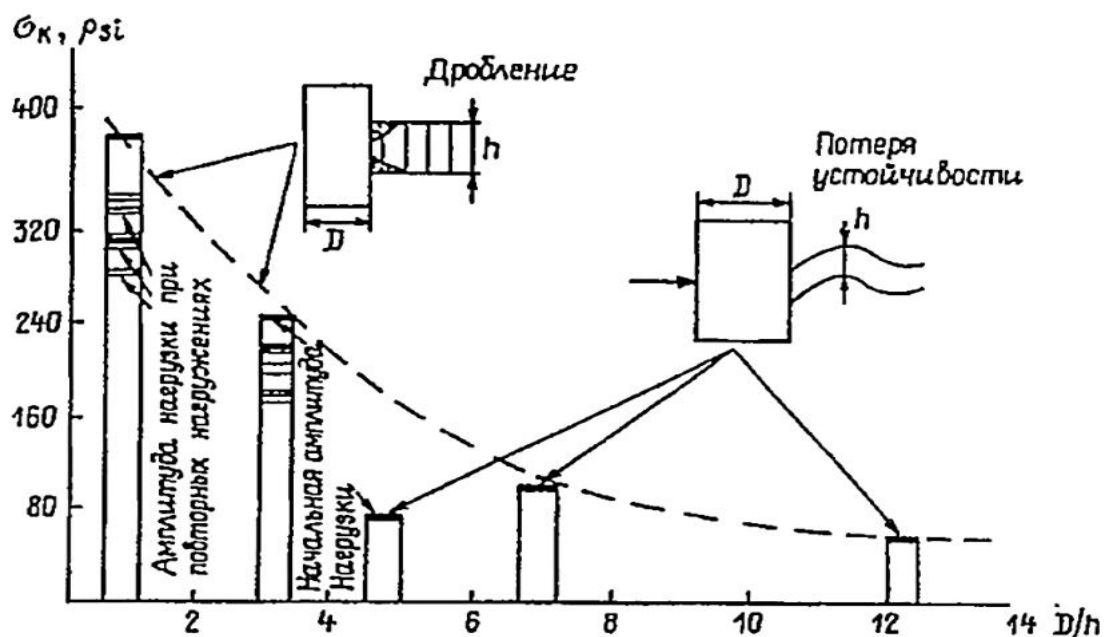


Рисунок 2.2.20 График зависимости контактного давления льда на опору сооружения от соотношения d/h при $\dot{\epsilon} = V/D = 5 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-2}$ 1/с по Nevel and Perham [64];

При $B/h < 5$ разрушение, как правило, осуществлялось за счет дробления **вне зависимости от скорости загрузки**, при $B/h > 5$ **снижение скорости нагружения приводит к изменению картины разрушения** - лед может разрушаться за счет изгиба и потери устойчивости на расстоянии 0,6 – 0,9 м, как сжатая пластинка. При $B/h > 10$ лед вокруг опоры разрушался во всех случаях за счет потери устойчивости или изгиба. **Во всех опытах отмечается опережающий рост радиальных трещин во льду по фронту опоры, а загрузка опоры при разрушении льда дроблением носило циклический характер**, причем, как правило, первый цикл загрузки (в зависимости от условий контакта) имел наибольшую амплитуду (пик) изменения давления.

2.2.4 Исследования влияния скорости движения ледового поля на картину разрушения льда и на значения контактного давления

Во многих исследованиях тип (механизм) разрушения льда экспериментаторы связывали со скоростью движения ледового поля. Определяющую роль большинство исследователей отводят зависимости этого явления **от скорости деформирования объема льда $\dot{\epsilon}(L_{cr})$** формирующегося перед опорой при движении ледового поля. С этой целью эксперименты проводились многими исследователями как в бассейнах на модельном льду [17,47,47, **57**,58,60,64,83,84,86,103], так и на натурном льду, прорезаемому моделями опор [Беккер, Карулины, Саеки Такеушии, 121]. Следует заметить, что **в экспериментах ряда авторов эта гипотеза не нашла однозначного подтверждения**.

Одной из первых и **значимых для дальнейших исследований** работ следует представить работу Michel и Toussaint [57] в 1977 г. Они провели свои опыты в лабораторных условиях с использованием гидравлического пресса. Основной целью их исследования было **изучение влияния скорости процесса нагружения (деформирования) льда при взаимодействии с вертикальной узкой опорой** и экспериментальная проверка гипотезы определяющего влияния скорости (условной) деформаций ледяного поля, на значение коэффициента смятия выдвинутой авторами ранее (Michel и Toussaint [57];) равной

$$\dot{\epsilon} = V/K \cdot D. \quad (2.2.5)$$

Где $K=4$. Значение $K=4$ – является предметом дискуссии на протяжении многих лет. Так, по данным R. Frederking с соавторами [22], например, K может принимать значения от 0,2 (малый размер льдины) до 2,0 (большой размер льдины перед опорой). Другие исследователи также предлагали иной подход к определению скорости нагружения льда (см. раздел).

Н. Saeki, с соавторами [73,74,121] (1977-1984) в своих опытах на озере Сарома на Хоккайдо установили, что скорость вдавливания имеет большое значение для разрушения льда по тому или иному **механизму разрушения**. При низкой скорости или высокой

температуре лед ползет, его кристаллическая решетка разрушается микротрещинами, но за счет интенсивных процессов перекристаллизации он не теряет своей сплошности (Рисунок 2.2.21,а и 2.2.22-тип «D»). Но на **высокой скорости преобладают процессы хрупкого разрушения типа скалывания** больших и малых блоков льда. На промежуточной скорости оба этих режима разрушения имеют место.

Основной целью экспериментов Кгу [47], проводившихся в 1981 г., было изучение физических закономерностей разрушения льда при взаимодействии с цилиндрическими опорами **при разных скоростях движения льда, различных геометрических и физико-механических его параметрах и размерах сооружения**. Им были выполнены опыты в морозильной камере на стенде, аналогичном стенду, показанному на рисунке 2.2.19,а, но расположенном вертикально. Ледяная плита ($h = 1,5- 5,0$ см) имела ширину 1м и высоту 0,5 м, а размеры моделей опор имели диаметры 26 и 12 см. На основании результатов экспериментов этим автором были выявлены **три типа разрушения льда** перед моделью опоры в зависимости от скорости нагружения и прочности льда: вязкое смятие (пластичное выдавливание), вязкое разрушение **путем расслоения и скола льда** и хрупкое разрушение путем **дробления и скола**.

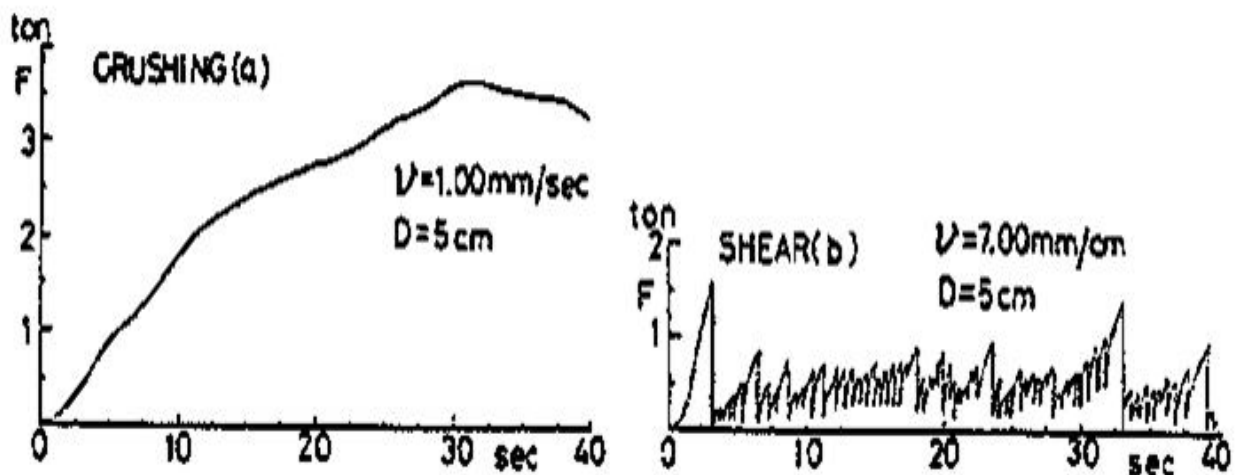


Рисунок 2.2.21 вид диаграмм ледовой нагрузки на модель опоры сооружения при низкой скорости прорезания (а) и высокой скорости воздействия на грань ледового поля (б) – по Saeki с соавторами [73,121]

Схемы разрушения льда различных типов, а также характерные диаграммы нагружения моделей опор ц диапазоны изменения скоростей деформации представлены на рисунке 2.2.22. Автор резюмирует на основе его наблюдений, что первый тип разрушения третий «**BF**» при большой скорости нагружения. Наибольшие нагрузки возникают при втором типе разрушения льда. Здесь наглядно видно, что при средней и большой скорости прорезания льда опорой ледовая нагрузка меняется циклически, причем с увеличе-

нием скорости частота действия нагрузки увеличивается. «D» - возникает при медленном загрузении, второй тип «DF» - при средней скорости и метра опоры. Автор делает важный вывод о том, что с увеличением скорости движения и толщины ледяного поля уменьшается зона разрушенного льда перед опорой, что является одной из причин увеличения частоты действия ледовой нагрузки.

Серию мелкомасштабных экспериментов в ледовом бассейне размером 6 x 3 x 1 м выполнили Накајита с соавторами [60] в 1981 г.. Модели имели форму цилиндров с диаметрами $D=5; 10; 20; 30$ см, толщина ослабленного мелкозернистого льда была $h \sim 5$ см. **Скорость движения модели при проведении опытов изменяли от 2 до 20 см/с.** При больших скоростях перемещения $V > 10$ см/с ледяное поле перед моделью разрушалось аналогично разрушению в натуральных условиях, **за счет образования призм скола** (см.рис.2.2.22), *без развития горизонтальных трещин*. Наибольшие нагрузки соответствовали скоростям перемещения модели $V=2$ см/с.

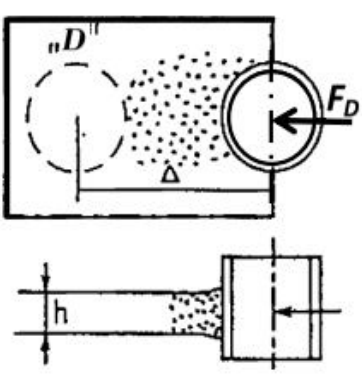
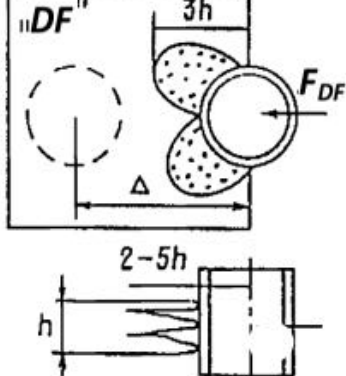
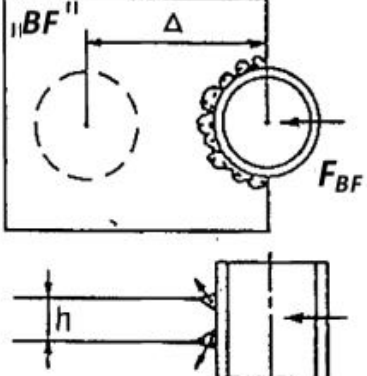
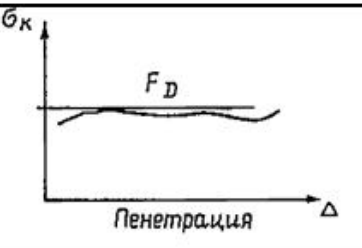
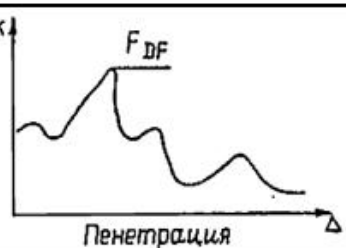
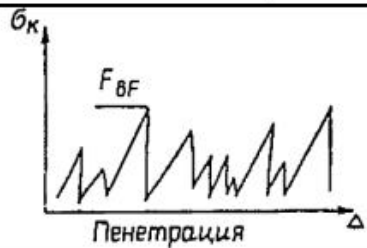
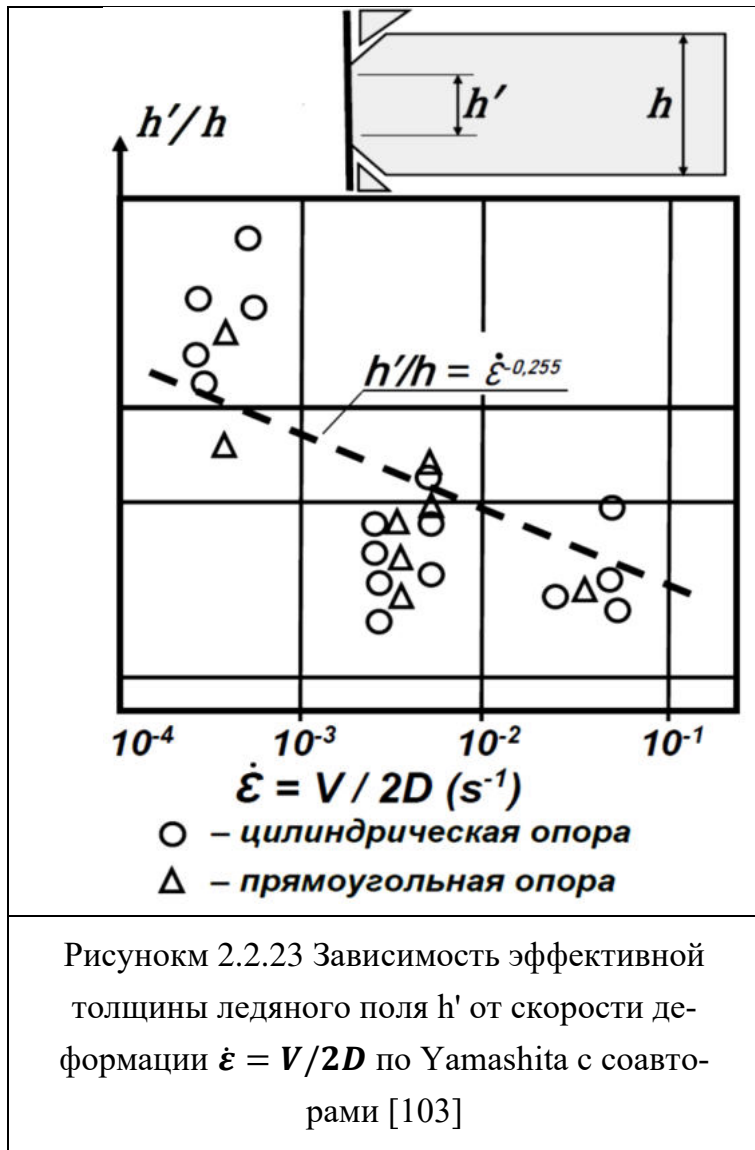
Т и п "D" (Ductile) (пластичное выдавливание)	Т и п "DF" (Ductile-Fracture) (вязкое разрушение)	Т и п "BF" (Brittle-Fracture) (хрупкое разрушение)	Тип разрушения
			Схема разрушения
			Диаграмма нагружения
$5 \cdot 10^{-4} \sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ $t_i = -10^\circ \text{C}$	$5 \cdot 10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ с}^{-1}$	$10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ с}^{-1}$	Диапазон скорости порезания
Не наблюдалось	$7 \cdot 10^{-3} \sim 5 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$	Не наблюдалось	Лаборат. Натра

Рисунок 2.2.22 Типы (механизмы) разрушения льда для разных скоростей ледового поля по результатам исследований Крю [47]

Опыты Крю [47] показывают, что частотные характеристики давления льда на опору находятся в сложной зависимости от скорости движения, толщины ледяного поля

и диа



Также в ледовом бассейне в 1982 г. Frederking R. с соавторами [22,17,21] проводили опыты с искусственно намораживаемым соленоводным ослабленным льдом толщиной 41~46 мм. В опытах обеспечивалось прорезание ледяного поля цилиндрическими моделями $D=50\sim500$ мм с различными скоростями. В этих опытах разрушение льда во всех случаях осуществлялось путем дробления. Значения коэффициентов смятия уменьшаются с ростом параметра D/h , в то же время с увеличением скорости V различие в значениях коэффициентов смятия для малых и больших диаметров несущественно.

Yamashita с соавторами [103] провели в 1985 г. серию лабораторных опытов на специальном стенде, где в качестве модельного ледового поля использовался тонкий натур-

ный лед с восточного побережья о. Хоккайдо. Модели опор плоской и цилиндрической форм с рабочим размером $D=200\text{--}390$ мм гидравлическим домкратом вдавливались в ледовую плиту толщиной $h = 40$ мм со скоростями $V=0,2; 2,0$ и 20 мм/с, что соответствовало значениям относительной скорости деформации ледяного поля $\dot{\epsilon} = V/2D$ перед моделью в пределах $\dot{\epsilon} = 10^{-4}\text{--}10^{-1}$ с $^{-1}$. Эти исследования показали, что при разрушении торцевой грани ледового поля дроблением образуются скопы льда у верхней и нижней кромок рабочей грани ледовой плиты и ее эффективная толщина h' (в отличие от фактической h) зависит от скорости деформации ледяного поля (Рисунок 2.2.23).

Данные экспериментов также выявили, что с увеличением скорости нагружения $\dot{\epsilon}$ значение h' уменьшается, так как растут размеры зоны разрушения льда перед опорой. На основе многофакторного анализа эти исследователи предложили общие зависимости для определения ледовой нагрузки для цилиндрической опоры в виде:

$$F = 2,7 \cdot D^{0,5} \cdot h^{1,1} \cdot V^{-0,25} \cdot R_c ; \quad (2.2.6)$$

для прямоугольной опоры :

$$F = 3,26 \cdot D^{0,5} \cdot h^{1,1} \cdot V^{-0,25} \cdot R_c . \quad (2.2.7)$$

где D, h приняты в сантиметрах, V – в см/с и R_c – в Па.

Авторы [103] отметили, что разрушение ледяного поля при высоких скоростях нагружения сопровождается интенсивным развитием трещин. С учетом этого явления авторы предложили оценивать значение ледовой нагрузки в момент инициации начала развития трещин по критическому значению коэффициента интенсивности напряжений трещинообразования K_{Ic}^* , значение которого определяли на основании испытаний ледяных балок на изгиб.

Метод испытания в исследованиях Michel и Jolicoeur [56] (1986) отличался тем, что прямоугольная модель – штамп диаметром от 0,6 до 20 см продавливался гидравлическим прессом с различной скоростью в кромку ледяной плиты размером 81х 81 см и толщиной 2,5 – 10 см (структура S2, средний размер кристалла 7,5 мм), заключенной в жесткую обойму, Авторами наблюдались **три типа (механизма) разрушения льда**: вязкое, переходное (смешанное) и хрупкое — в зависимости от скорости деформации льда перед опорой $\dot{\epsilon}$. Номинальное давление на опору зависит от скорости деформации ледяного поля:

$$p = I \cdot m \cdot K \cdot R_c \cdot (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)^a \quad (2.2.7)$$

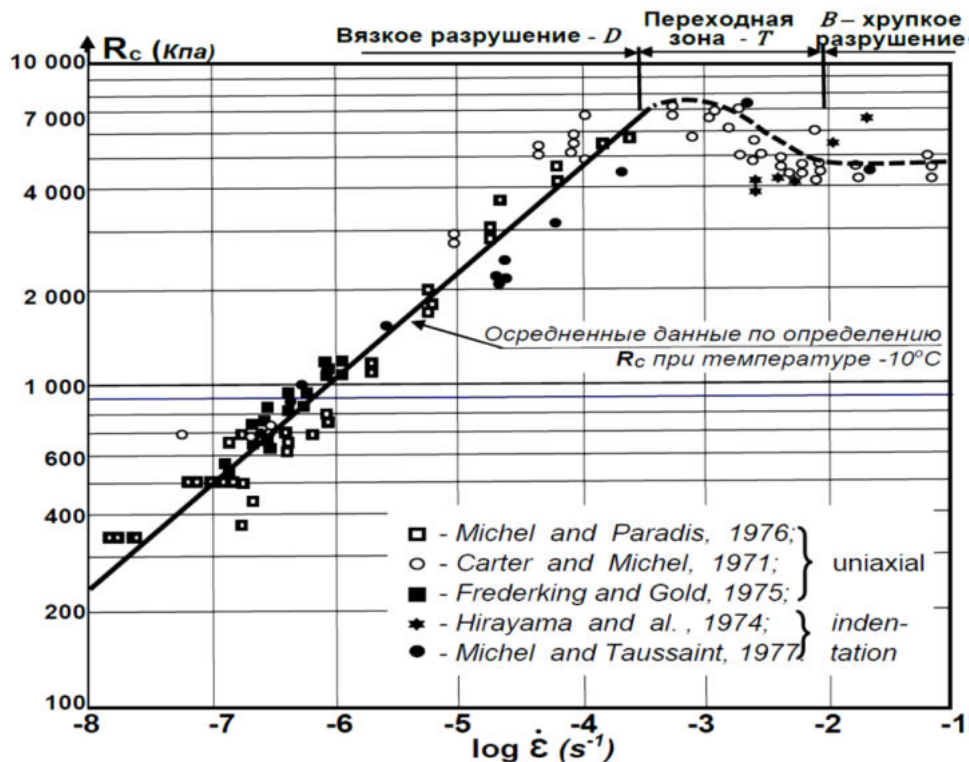


Рисунок 2.2.24 Предел прочности льда по результатам испытаний образцов и моделей штампов при вдавливании в кромку ледяного поля в зависимости от скорости деформирования по [21,56,57,77]

Основные результаты исследований зависимости R_c от скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ в сопоставлении с данными других авторов представлены на рисунке 2.2.24 при скоростях деформаций, соответствующих **вязкому** $\dot{\epsilon} = V/B < 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, **полухрупкому (переходному)** $1,5 \cdot 10^{-3} < \dot{\epsilon} < 3 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, и **хрупкому разрушению** $\dot{\epsilon} < 3 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Значения параметров для различных зон также различны. В зоне **вязкого разрушения** $I = 2,97$; $R_c = 7.0$ МПа; $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с}$; $m = 1$ для плоского штампа; $K = 1,0$ для начального и $K = 0,6$ – для последующих нагружений; $a = 0,32$. Для **переходной зоны** используются те же коэффициенты, кроме $a = -1,126$; $K = 0,25$ – для последующего нагружения. Для зоны **хрупкого разрушения** $I = 3,0$; R_c – при хрупком разрушении определяется опытами; $a = 0$; $K = 0,3$ для повторного нагружения.

Результаты опытов [56] можно рассматривать как вариант введения в расчеты ледовой нагрузки постоянного значения коэффициента смятия независимо от D/h а R_c – считать величиной, зависящей от $V/4D$.

2.2.5 Экспериментальные исследования разрушения кромки ледового поля свободными сколами (сдвигом) клинообразных блоков

В этот же период конца 60-х, начала 70-х годов 20 века ряд авторов, выполнявших их исследования в натурных условиях (Blenkarn [7]; Schwarz [76]; Кореньков [116, 117], Neill G.R. [120]), на основании своих наблюдений сделали выводы о том, что резкие колебания нагрузки, как правило, бывают вызваны сколом (сдвигом) клинообразных блоков льда к верхней и нижней поверхностям ледового покрова. Blenkarn [7], в частности, **«сдвиговое» разрушение** льда (*shearing failure of the ice itself*) обозначил как **основной тип** (механизм) разрушения в условиях дрейфа льда в заливе Кука.

Подтверждение реальности такого механизма разрушения льда следует из результатов опытов по прорезанию натурального льда моделями опор (Вершинин с соавторами [113,115]; Croasdale с соавторами [10]; Н. Saeki с соавторами [73,121]; Taylor [89]; Кры [47]; Оjima с соавторами [66] и др.). Схемы скалывания блоков льда по данным некоторых из названных авторов приведены на рисунках 2.2.1.3;10;11. Ниже даны аналогичные схемы из работ разных авторов [10,66,89,103] для условий прорезания натурального льда моделями опор.

В этих работах их авторы помимо фиксации фактов разрушения кромки ледового поля скалыванием «верхнего и нижнего клиньев», отмечают, что в начальный момент контакта амплитуда пика давления льда на опору, также как отмечалось и в работах [7,64,70,74,76,113,115–117], значительно превышает амплитуды последующих пиков (Рисунки 2.2.25,д и 2.2.26). Кроме того, в работе [89] Taylor отмечает в своих наблюдениях, что сдвиг участков торцевой грани ледового поля может происходить после расщепления горизонтальными трещинами и вид сколов приобретает ступенчатый вид (Рисунок 2.2.25,б).

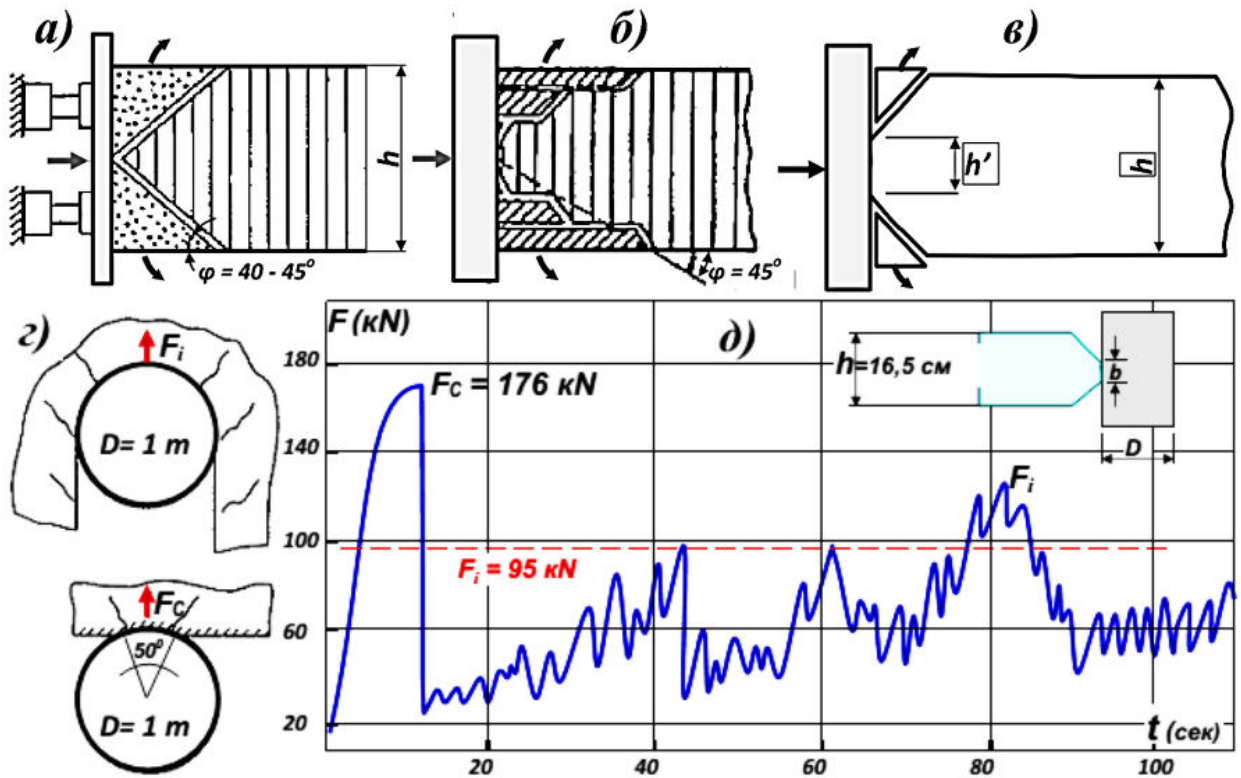


Рисунок 2.2.25 Схемы разрушения кромки ледового поля путем скалывания (сдвига) клиновидных блоков льда в стороны свободных поверхностей ледового покрова: а) – по Croasdale с соавторами [10]; б) – по Taylor [89]; в) – по Yamashita с соавторами [103]; г,д) – по Ojima с соавторами [66]

Аналогичные наблюдения были ранее также сделаны и в работах [32,76] при исследовании явления прорезания дрейфующих морских ледяных полей опорой моста. Эти авторы отметили зависимость увеличения числа плоскостей сдвигов в торцевой кромке ледового поля при увеличении толщины льда. А Yamashita с соавторами в их работе [103] по данным их экспериментов связывают высоту передней грани среднего клина льда после образования сколов h' со скоростью движения ледового поля (Рисунок 2.2.25,в).



Рисунок 2.2.26 Схема очередности разрушения кромки ледового поля путем скалывания клиновидных блоков льда и соотношения пиков ледовой нагрузки в начале процесса и далее по Croasdale с соавторами [10]

Sodhi и Morris [84,83] представили диаграмму силы, разрушающей лед, в виде отдельных пиков при небольшой скорости движения индентора. Ими, также как и Верши-

ниным с соавторами [113,115] и Saeki с соавторами [73,121], была предложена идеализированная схема процесса разрушения льда сдвигом блоков льда в сторону свободных нижней и верхней поверхностей, что зафиксировано ими на фотографии (Рисунок 2.2.27,в).

Эти авторы именно сдвиговым механизмом разрушения льда объяснили характер нагрузки в виде пилообразной кривой (Рисунок 2.2.27,б) и предложили зависимость для определения частоты скалывания льда на опоре (параметра цикличности ледовой нагрузки) от его толщины h и скорости ледового поля v в виде $f = cv/h$, где c имеет значение около 3. Выводы этих авторов основаны на результатах обширных лабораторных экспериментов при испытаниях моделей свай на ледовую нагрузку диаметром $50 \div 500$ мм/с при толщинах льда $50 \div 80$ мм и скоростях движения моделей в пределах $10 \div 210$ мм/с.

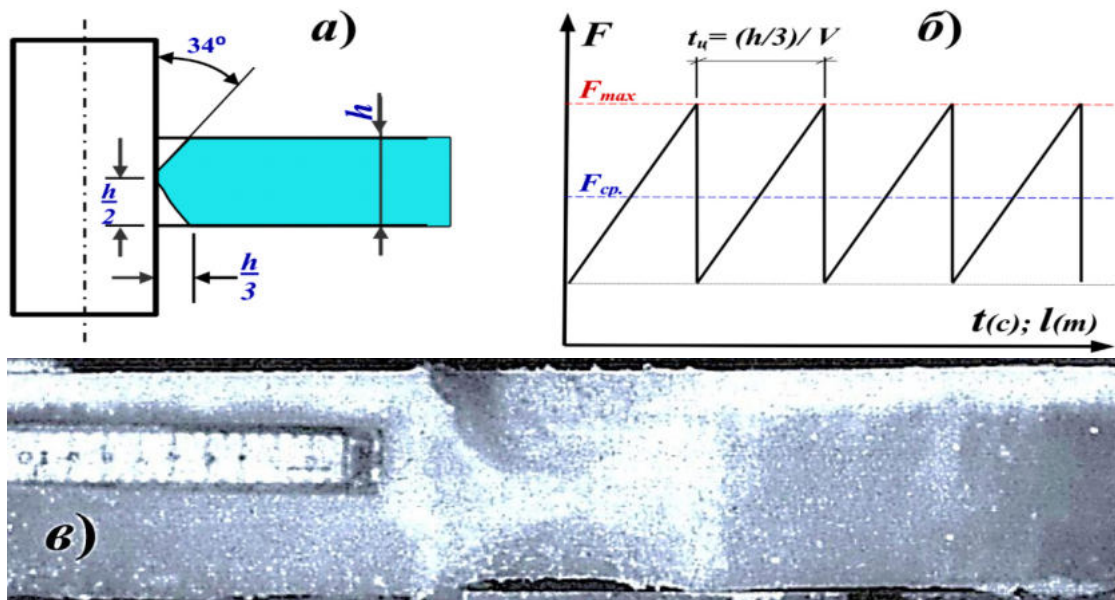


Рисунок 2.2.27 Механизм разрушения грани ледового поля по Sodhi и Morris [84,83] : а) геометрические соотношения в зоне разрушения;

б) – график ледовой нагрузки при сдвиговом механизме разрушения и

в) – фотография сколов ледовой плиты перед передней гранью опоры

Следует отметить, что геометрия объемов разрушения льда сколами к свободным верхней и нижней поверхности ледовой плиты перед гранью опоры, показанная на фотографии, выполненной в лаборатории (рисунок 2.2.27,в), совпадает по форме блоков скалывания с геометрией подобных разрушений, зафиксированных в работе Taylor [89] при прорезании натурального льда моделями опор в морских условиях.

Выводы по разделу

Основными результатами всех рассмотренных экспериментов (в т.ч. не представленных здесь) можно считать:

– движущийся лед перед опорой *разрушается по двум основным типам: прорезанием и потерей устойчивости* ледового поля. Установлено, что контактная сила *при прорезании* льда всегда больше, чем при потере устойчивости пластины и поэтому **расчетным случаем всегда будет случай прорезания льда опорой, когда лед разрушается дроблением;**

– влияния «степени стеснения зоны нагружения льда» на значения его контактного давления на опору и на **характер разрушения льда «в условиях стеснения»** в зоне контакта опоры со льдом исследовано полностью. Это явление объясняется общими положениями теории упругости: при относительно узких опорах за счет боковых, не подвергающихся непосредственному разрушению участков льда, но препятствующих боковому расширению льда в сжатой зоне перед опорой при ее внедрении в кромку ледового поля, в этой зоне создается сложное напряженное состояние (двухосное и трехосное сжатие), увеличивающее сопротивление льда разрушению. Основным результат таких наблюдений: при постоянной толщине льда удельное **контактное давление льда на опоре большего диаметра снижается. Коэффициент изменения значений контактных напряжений СУЩЕСТВЕННО зависит от параметра D/h** («коэффициент стеснения») и определяет, в первую очередь, **вид напряженно - деформированного состояния** льда и учитывается в расчетах ледовой нагрузки. С увеличением скорости льда различие в значениях коэффициентов смятия для малых и больших диаметров несущественно;

– существенную роль в процессе разрушения льда *при небольших скоростях движения льда* играют **горизонтальные кольцевые** (расщепляющие) плиту льда трещины, а также **вертикальные (раскалывающие) радиальные трещины**. Природа появления этих трещин объясняется решением Герца, когда при определенных соотношениях диаметра опоры D и толщины льда h на некотором удалении от области гидростатического обжатия перед поверхностью внедряющейся опоры, растягивающие напряжения как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости достигают пика, что приводит к образованию плоских трещин, расщепляющих плиту льда в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Во всех опытах отмечается опережающий рост радиальных трещин во льду по фронту опоры.

– записи напряжений во льду перед опорой показывают, что итогом процесса упругого деформирования льда в начальной стадии нагружения часто становится спонтанное **образование горизонтальной, также как и вертикальной трещин**. Эти явления *«разгружают» ледовый покров: упругие напряжения в зоне контакта резко падают, продолжение процесса загрузки ледовой плиты приводит к следующим пикам разрушения льда,* но уже при меньших значениях напряжений;

– прорезание ледового покрова опорой может происходить за счет дробления льда: разрушения льда по механизму типа «скалывания боковых клиньев», т.е. блоков льда треугольной формы различного размера;

– явление сколов (*сдвигов*) льда порождает **циклическое разрушение льда**, ледовая нагрузка при этом имеет вид пилообразной кривой с пиками и провалами контактной силы. Каждый цикл нагрузки при этом состоит из накопления повреждений в зоне контакта, затем происходит резкий скол блоков льда у нижней и верхней поверхности кромки ледового поля, затем происходит **смятие «среднего клина»** льда в зоне контакта. С увеличением скорости нагружения высота рабочей грани среднего клина уменьшается, так как растут размеры зоны разрушения льда перед опорой (длины скалываемых участков);

– прорезание ледового покрова опорой может происходить также по **механизму «непрерывного разрушения»** в виде некоторой области его разрушений, перемещающейся в массиве плиты льда под натиском жесткой опоры впереди ее поверхности и выжимания продуктов разрушения льда из зоны контакта за счет дробления «теплого» льда или при высокой скорости взаимодействия;

– весьма существенное влияние на характер разрушения льда по тому или иному **механизму разрушения** имеют скорость нагружения льда, его температура и соленость. Выявлены **три типа разрушения льда** в зависимости от скорости нагружения и прочности льда: **вязкое смятие** (пластичное выдавливание), вязкое разрушение **путем расслоения и скола льда** (полухрупкое) и **хрупкое** разрушение путем **дробления и скола**. Наибольшие нагрузки возникают при втором типе разрушения льда;

– ряд исследователей, с учетом аналогичных явлений в материаловедении, поставили под сомнение широко распространенное убеждение, что существует явление аномально высоких значений предела временной прочности льда в средней части шкалы скорости деформирования льда в области его реальных воздействий на сооружения.

– в ряде работ показано, что частотные характеристики давления льда на опору находятся в сложной зависимости от скорости движения, толщины ледяного поля, жесткости льда и диаметра опоры. Исследователи делают важный вывод о том, что с увеличением скорости движения и толщины ледяного поля уменьшается зона разрушенного льда перед опорой, что является одной из причин увеличения частоты циклического действия ледовой нагрузки.

Описывающая принятую в нормативной методологии расчетную «модель предельного состояния», изображенную на Рисунке 2.2.28 формула определения силы ледового давления на опору МЛС представляет классическое описание прочности плоского сечения в напряженном элементе конструкции при ее статическом нагружении формулой типа (1.3.4), которая в общем виде представлена простым произведением факторов:

$$F_{\text{ЛП}} = m \cdot R_{\text{см}} \cdot B \cdot h \text{ (кН)} \quad (2.8)$$

где: $m = k_i \cdot k_j \cdot k_k \cdot k_n$ – «коэффициенты соответствия» – учет скорости ЛП, солёности льда, формы опоры МЛС и плотности ее контакта со льдом и пр. Очевидно, что формула (2.8) может дать *только максимальное значение* ледовой нагрузки на МЛС путем подстановки в нее соответствующих расчетных параметров, в частности призмической прочности льда σ_0 в $R_{см.}$, что *не показывает проблему цикличности* ледовой нагрузки, которая *в реальных процессах имеет явно динамический характер*, что следует из выполненного здесь анализа исследований (Рисунок 2.2.28).

Приведенный обзор исследований показывает (Рисунок 2.2.28), что каждое нарушение сплошности массива льда в зоне его контакта с поверхностью индентора есть *результат реализации упруго накапливаемых в процессе воздействия во льду деформаций* в виде трещин, начиная от накапливающихся микротрещин и всех разновидностей, типов и видов трещин. Из элементарного анализа всего комплекса трещин, их локации в зоне контакта, можно сделать понятный вывод о том, что *математически корректное описание комплексного процесса разрушения ледового поля* на его контакте с сооружением *с использованием существующих методов* описания напряженно-деформированного состояния массива материала и известных *силовых критериев* предельного состояния теории упругости на данном этапе *представляет большие, возможно - непреодолимые трудности*.

В качестве основной задачи в исследованиях циклического характера ледовой нагрузки на основания буровых платформ следует считать задачу комплексного исследования механизма генерирования циклического разрушения льда в условиях взаимодействия с опорой сооружения для получения адекватного описания параметров этого сложного динамического процесса.

2.3 Анализ результатов исследований параметров цикличности ледовой нагрузки на реальных сооружениях

2.3.1 Исследования воздействия льда на опытные основания в заливе Кука

Первый научный интерес к пониманию динамического характера взаимодействия сооружений, взаимодействующих с дрейфующими ледовыми полями возник в конце 1960-х годов, в связи с началом освоения морских месторождений углеводородов. Это явление впервые изучалось на специально построенных исследовательских стационарных вертикальных свайных платформах в заливе Кука на Аляске (Рисунок 2.3.1–а,б).

Первыми исследователями, которые начали применять такие методы на морских сооружениях, были

Н.Р. Peyton [83] и К.А. Blenkarn [9], получившие в 1966-1970 годах записи ледовой нагрузки на сооружения установленные в заливе Кука на Аляске (Рисунок 2.3.1–в,г). Измерения Н.Р. Peyton [83] показали, что частота изменения ледовой нагрузки при медленном движении поля составляла около 1,0 Гц, что совпадало с собственной частотой сооружения. Исходя из этого, сравнивая свои наблюдения с результатами лабораторных испытаний, исследователь пришел к выводу, что лед имеет “характерную частоту разрушений” и что **частота разрушения льда зависит от скорости движения ледового поля** (Рисунок 2.3.1–в), но он ошибся в том, что этот параметр процесса взаимодействия является *постоянной для всего спектра собственных частот сооружения*.

Результаты подобных исследований, проводившихся К.А. Blenkarn [9], также на свайном основании платформы в заливе Кука с помощью калиброванных тестовой сваи и измерительной балки, оборудованных тензометрическими датчиками, показали **повышение значений ледовой нагрузки и амплитуды колебаний сооружения при определенных сочетаниях толщины льда и скорости дрейфа** ледовых полей (Рисунок 2.1.1–г). Автор этого исследования, на основании записей циклической ледовой нагрузки на экспериментальную свайную конструкцию, испытываемую им в условиях дрейфа льда в заливе Кука на Аляске, предположил, что **ледовое поле и сооружение следует рассматривать как «систему связанных элементов»**.

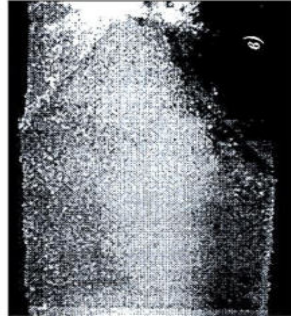
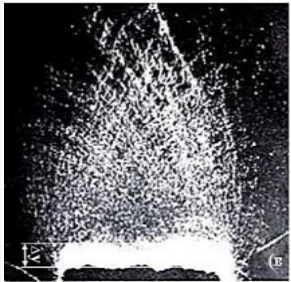
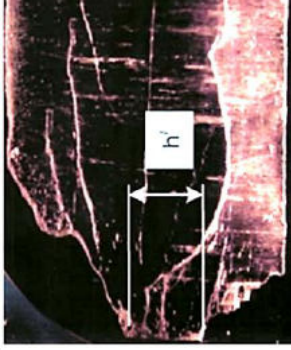
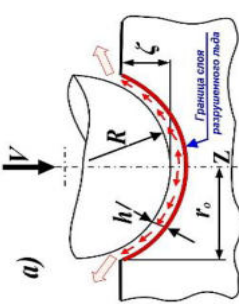
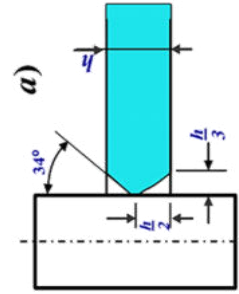
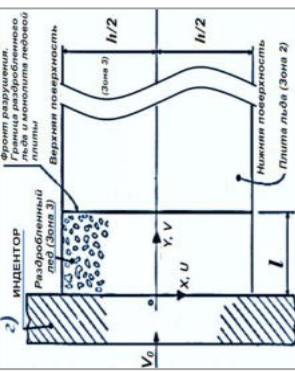
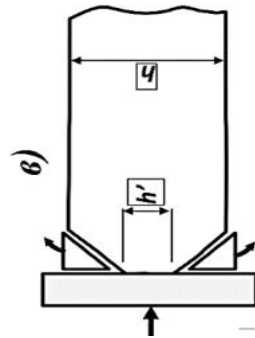
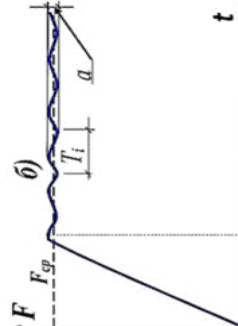
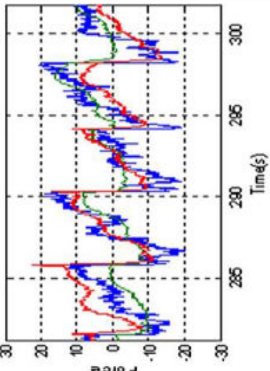
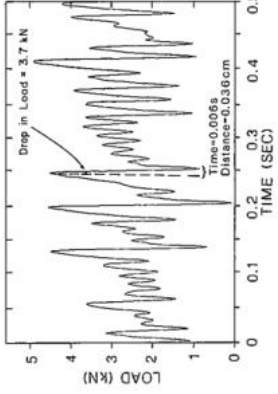
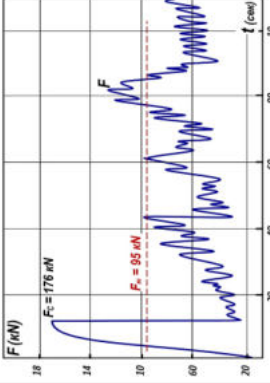
ТИП МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ	СПЛОШНОЕ СМЯТИЕ ПО ВСЕЙ ТОЛЩИНЕ ПЛИТЫ	СДВИГИ «КЛИНЬЕВ» С ВЕРХУ И СНИЗУ ЛЕДОВОЙ ПЛИТЫ	СПЛОШНОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ СО СМЯТИЕМ И ЭКСТРУЗИЕЙ	СДВИГИ «КЛИНЬЕВ» И СМЯТИЕ СРЕДНЕГО КЛИНА ПЛИТЫ
РЕАЛЬНЫЙ ВИД КАРТИНЫ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА				
СХЕМА ДЛЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ				
ВИД ГРАФИКА ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ				
ЛИТЕРАТУРНЫЕ ИСТОЧНИКИ	Хейсин, Курдюмов, Лихоманов (1976); Frederking и др. (1990); Spenseri др. (1992); Singh и др. (1993); Tukhuri и Riska (1994); Karna и др. (2000); Shkhinek и др. (2001); Yue, Guo, Kärnä (2009); Wang и др. (2014);	Blenkarn (1970); Croasdale и др. (1970); Neill G.R. (1970); Schwarz (1974); Кореньков (1973, 1976); Вершинин с соавторами (1973, 1975); Kry (1980); Taylor (1981); Саэки, Озани (1983); Michel и Blanchet (1983); Yamashita и др. (1985); Ojima и др. (1985); Sodhi и Morris (1986); Tukhuri (1995); Kamesaki и Yamauchi (1999); Yue, Guo, Kärnä (2009); Määtänen и др. (2011);	Kärnä и Turunen (1989); Jordaаn and Timco (1987, 1988)	Вершинин с соавторами (1973, 1975); Muhonen и др. (1992); Jordaаn и др. (1990-1993); Zou, Xiao, Jordaаn (1996); Johnston, Croasdale, Jordaаn (1998); Sodhi и др. (1998, 2001); Frederking и др. (1999); Appolonov et al. (1999); Jordaаn (2001); Appolonov (2002); Sodhi (2001, 2006); Li, Frederking, Jordaаn (2006); Гольдштейн, Осипенко (2011);

Рисунок 2.2.28 Четыре типа моделей разрушения льда, их схематизация и графики

Силу внешнего воздействия льда на опору автор работы представил как функцию относительной скорости движения опоры и льда $P = f(V_{лп-Х})$. Опираясь на известную в теории колебаний [131] «модель негативного демпфирования», К.А. Blenkarn [9], ввел понятие эффекта «отрицательного трения» в системе ЛП–МЛО, возникающего в системе при возрастании скорости взаимодействия ЛП с МЛО при «обратном» движении опоры сооружения к положению ее статического равновесия. Эффект «отрицательного демпфирования» К.А. Blenkarn [9] обосновал наличием у льда, как материала, ниспадающей ветви зависимости его прочности от скорости приложения нагрузки к испытываемому образцу (или скорости его деформирования), ссылаясь на эксперименты Н.Р. Peyton [83]

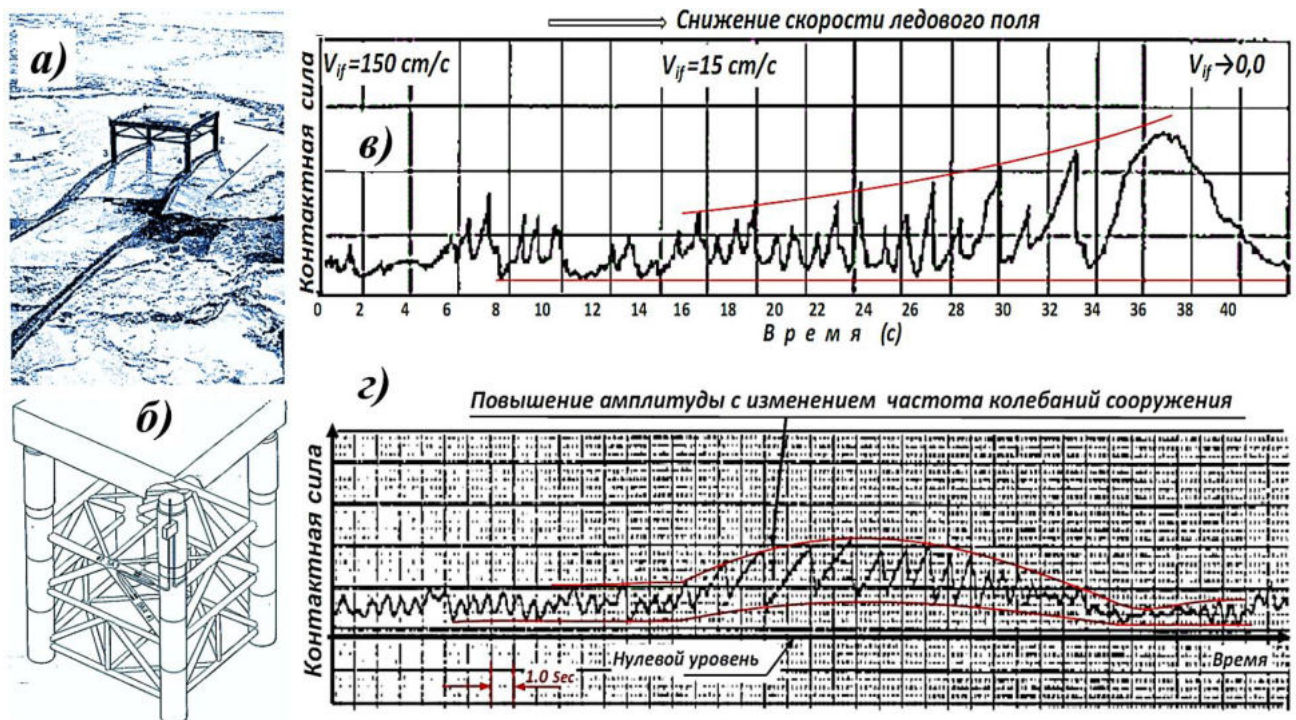


Рисунок 2.3.1 Опытные платформы в заливе Кука для измерения давления

льда на опоры: а) – по Н.Р. Peyton [83] и б) – по К.А. Blenkarn [9]

В последующие годы натурные эксперименты по исследованию различных аспектов рассматриваемой проблемы проводились рядом исследователей в различных регионах мира с использованием навесных тензометрических панелей, акселерометров, наклономеров, сейсмографов и других датчиков – источников первичной информации. Это дало возможность получить записи детального распределения контактного давления льда по всей площади контакта, исследовать функциональные зависимости пиковых значений ледовой силы и частот их появления от участвующих в процессе взаимодействия опоры с ледовым полем факторов. Такие технологии использовались на сооружениях в Ботническом и Бохайском заливах, на платформе Моликпак в море Бофорта и на Сахалине.

2.3.2 Исследования силового воздействия льда на речные сооружения

Характерно, что в тот же период времени другие исследователи, исследуя характер силового воздействия льда на опоры бычков мостов и плотин в период ледохода [89,92,178,179,197], показали, что лёд в этом случае разрушается циклически, несмотря на практическую неподвижность опор (Рисунок 2.3.2).

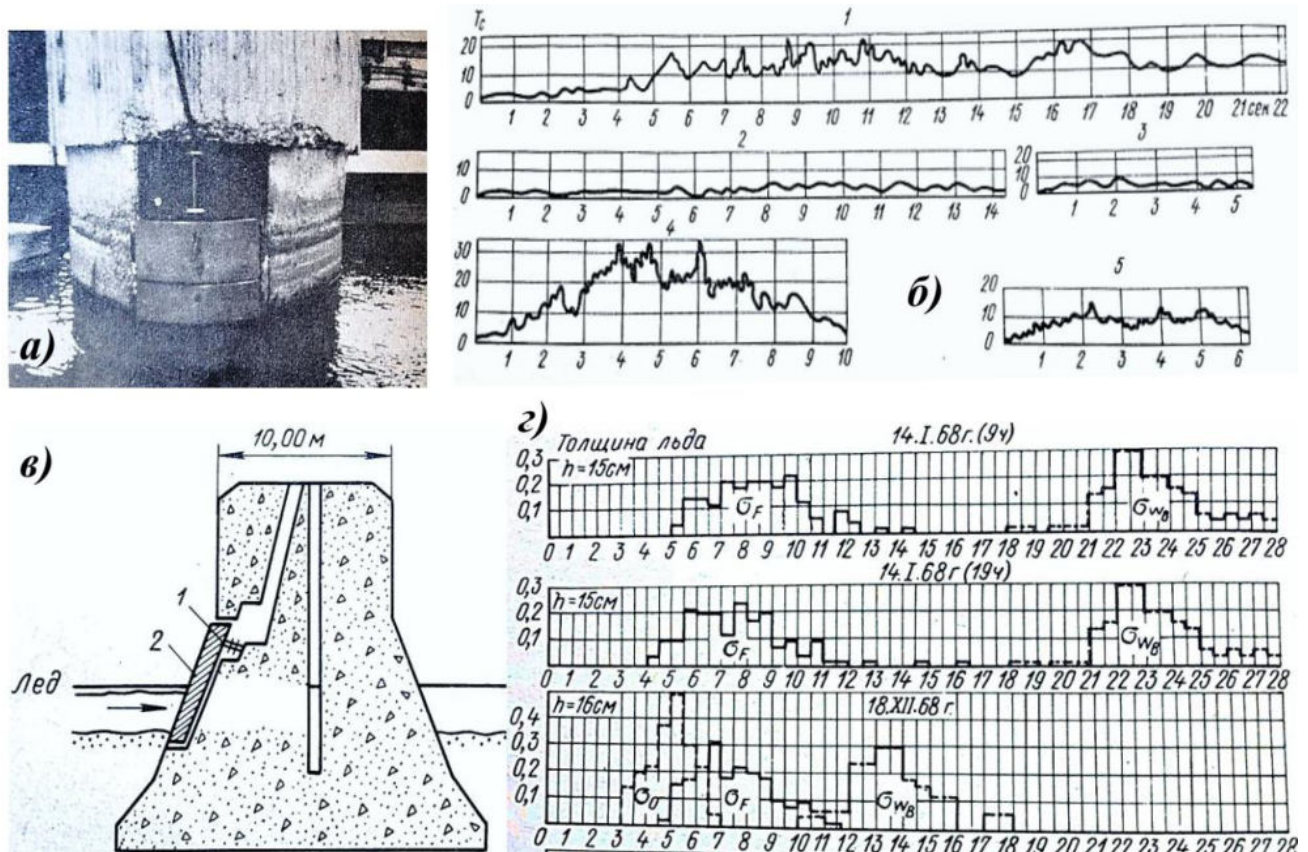


Рисунок 2.3.2 Записи инструментальных измерений силы давления льда с помощью тензоплит: а, б) – на бычке водосливной плотины в Сибири [178, 179]; в) – на опоре моста через реку Атабаска в Канаде [197]; г) – гистограммы величин удельного давления и прочности льда по результатам измерений на р. Эйдер в Германии [89, 92]

Приведённые на Рисунке 2.3.2 примеры записей контактных сил характеризуют процесс взаимодействия ледяного поля с сооружением как нестационарное явление, которое носит динамический характер с ярко выраженной циклическостью. Резкие колебания значений контактных сил, как однозначно установлено всеми исследователями процесса взаимодействия ледяного поля с сооружениями, на работы которых приведены ссылки в подписи к этому рисунку, имеют единую природу – на непосредственно прилегающей к поверхности опоры сооружения кромке *движущейся с постоянной скоростью ледяной плиты* происходит периодическое разрушение льда.

Как видно из приведенных результатов реальных записей давления льда на неподвижные опоры сооружений, *период между максимальными значениями контактной силы* при взаимодействии сооружения с движущимся ледовым полем является одной из характеристик внешнего по отношению к параметрам опоры проявления механизма разрушения льда в зоне его контакта с поверхностью опоры. Следовательно, *цикличность разрушения льда является свойством самого льда, его жесткости (прочности) и геометрических и кинетических параметров ледового поля и сооружения.*

2.3.3 Исследования силового воздействия льда на маяки на Балтике

Менее чем через десять лет после обнаружения явления колебаний платформ от действия льда в заливе Кука с аналогичными проблемами столкнулись навигационные средства и маячные сооружения, построенные в Финляндии в Ботническом заливе, что в конечном итоге привело к повреждению и в некоторых случаях к разрушению этих сооружений [4,154]. Исследованиями ледовых сил, вызывающих вибрацию маяков в Ботническом заливе занимались Määttänen [58,59], также Engelbrektson [18] и др.

На одном из маяков были проведены инструментальные измерения, которыми зимой 1987 -1988 гг. были зарегистрированы несколько достаточно продолжительных периодов стабилизации частоты и амплитуды колебаний сооружения с частотами, близкими к частотам его собственных колебаний, которые были сгенерированы периодическим разрушением льда на поверхности сооружения. Такое явление «захвата» частоты собственных колебаний сооружения частотой разрушения льда получило название «явления блокировки» [78]. Для того чтобы сооружение достигло стабилизации пиковой амплитуды, потребовалось очень мало циклов разрушения льда, что привело авторов к выводу о том, что «механизм возбуждения» имеет значительную энергетическую составляющую, оказывающую влияние на отклонение сооружения и на скорость этого отклонения.

Продолжающиеся разрушения и повреждения навигационного оборудования на ряде маяков на Балтике привели к необходимости повышения надежности методов расчетов подобных сооружений, обосновывая их данными по реальному давлению льда на конструкции. Дальнейшие работы проводились учеными из 6 Европейских научно-исследовательских организаций [7,20,19, 61, 78, 90] в рамках двух программ, финансировавшихся Евросоюзом. В этих проектах не только были реализованы обширные прямые инструментальные измерения ледовых сил, вызывающих вибрацию маяков в Ботническом заливе, но также проведены теоретические исследования этого явления для гибких конструкций морских маяков. Один из маяков (Norströmsgrund) был оборудован девятью

навесными измерительными панелями (Рисунок 2.3.3) здесь были зарегистрированы несколько достаточно продолжительных периодов стабилизации частоты и амплитуды колебаний сооружения с частотами, близкими к частотам его собственных колебаний, которые были сгенерированы периодическим разрушением льда на поверхности сооружения.

В одном случае установившийся режим колебаний сохранялся около 190 циклов. Каждый из таких продолжительных периодов имел 8-10 циклов, в которых локальная нагрузка постепенно увеличивалась в течение каждого цикла при синхронизации разрушения льда с реакцией сооружения, в конечном счете, отклоняя его до 24-30 мм [7]. Поскольку увеличение отклонения сооружения приводило к нарастанию его жесткости, демпфирование системы было важным фактором, влияющим на пиковое значение усилия.



Рисунок 2.3.3 Размещение навесных измерительных тензометрических панелей на кессоне маяка Norströmsgrund

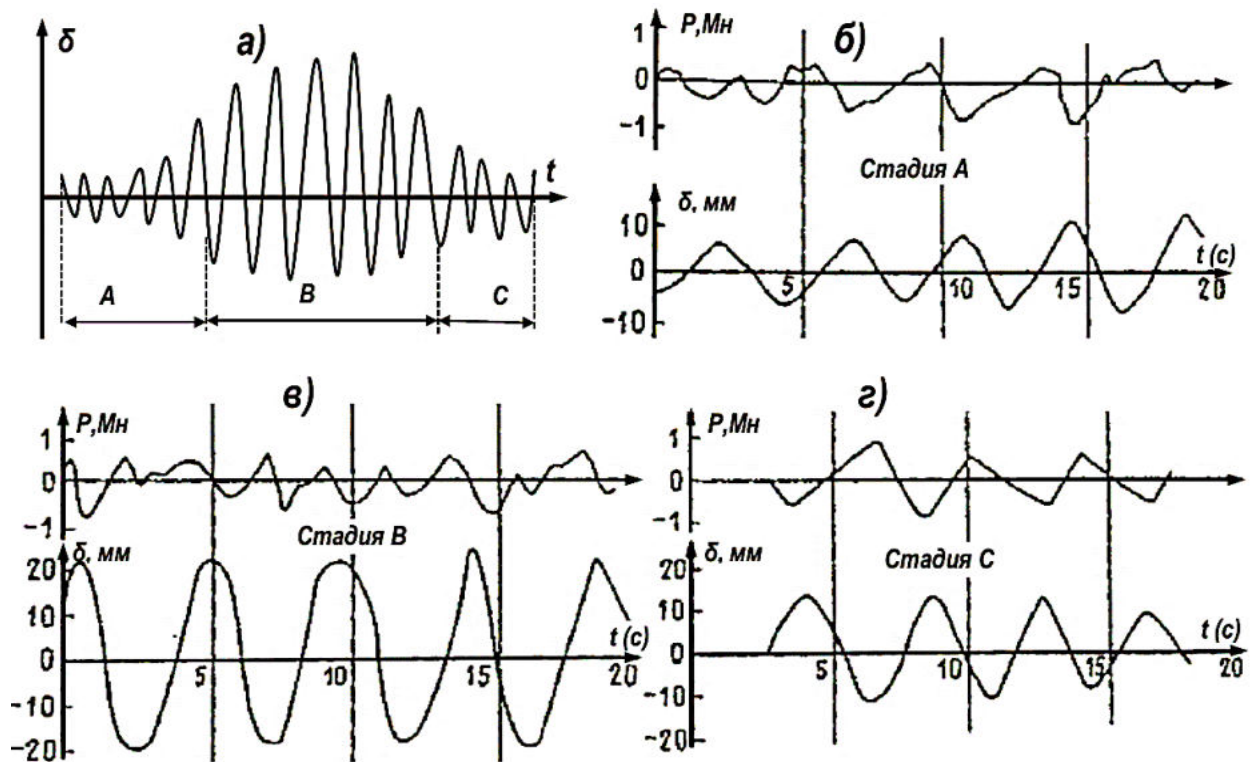
Для скоростей более 0,1 м/с, как правило, наблюдалось непрерывное дробление, нагрузки на сооружение при этой скорости льда были значительно ниже, чем при режимах прерывистого дробления или "блокировки". Но авторы отмечают, что *критическая скорость, выше которой происходило непрерывное дробление, изменялась в зависимости от толщины и температуры льда*. Результаты исследований этих авторов также, привели к выводам, что сила давления льда на опору маяка по характеру воздействия и уровню нагрузки зависит от **характера разрушения льда, который, в свою очередь, находится в зависимости от скорости дрейфа ледовых полей**, что ранее показали работы исследователей вибрации платформ в заливе Кука.

На Рисунок 2.3.4 приводится пример записи колебаний ледовых нагрузок на маяк

Norströmsgrund в Ботническом заливе и его деформаций, выполненный А. Engelbrektson [19]. Маяк в виде колонны диаметром 4,4 м при общей высоте 43 м с основанием кессона 23 м и шириной 10 м поверху, установлен на глубине 16 м.

В одном из событий взаимодействия ледового поля с толщиной льда в 30 см, дрейфующего со скоростью 0.1 м/с, запись производилась в течение 40 с. За этот период времени скорость ледового поля возрастала и были выявлены три характерные стадии колебательного процесса: стадия *A* (10-12 с) – нарастание амплитуды колебаний; стадия *B* (14-16 с) – колебания в резонансном режиме с постоянной амплитудой; стадия *C* (28-30 с) – затухание колебаний. Следует отметить, что подобные стадии развития процессов взаимодействия всегда подтверждаются результатами исследований других, ученых, причем как в натурных, так и в лабораторных экспериментах.

Рисунок 2.3.4 Записи ледовых нагрузок на кессон маяка



Norströmsgrund и его деформаций по Engelbrektson [18,19]: а) – развитие процесса взаимодействия; б-г) – характерные стадии колебательного процесса

Результаты обширных многолетних измерений давления льда на кессоны маяков в Ботническом заливе, показали, что частота пиков силы давления льда на сооружения, характер воздействия и численные значения силы определяются, в основном, *скоростью дрейфа полей льда, видом разрушения льда, который зависит от его прочности и скорости дрейфа ледовых полей.*

2.3.4 Экспериментальные исследования воздействия ледовых полей на нефтегазопромысловые сооружения в Бохайском заливе

Динамические эффекты, подобные наблюдавшимся на маяках на Балтике, которые в конечном счете привели к случаям разрушения сооружений, позднее исследовались на нефтебуровых платформах ферменного типа в Бохайском заливе на северо-востоке Китая. Здесь, согласно опубликованным сообщениям, две платформы были разрушены дрейфующим льдом в течение 10 лет [121,128]. Поэтому в конце прошлого, начале текущего столетия международной группой исследователей [37,39,124,125,126,188] в течение ряда лет проводилась одновременная фиксация изменений во времени силы воздействия льда, его скорости и перемещений сооружения.

В этот период несколькими группами ученых из разных организаций выполнялись комплексные полномасштабные исследования взаимодействия ледовых полей с буровыми платформами ферменного типа, а также основания типа «монопод», установленного в Бохайском заливе (Рисунок 2.3.5). Оснащение опоры сооружения тензометрическими панелями, акселерометрами, видео регистратором и тензометрическими датчиками напряжений в стальном корпусе сооружения (Рисунок 2.3.5-а,б) позволили провести комплексное исследование процесса динамического взаимодействия ледовых полей с сооружением.

Навесные панели для измерения ледовой нагрузки на опору содержали двенадцать независимых сегментов, что позволяло различать локальные силы льда и видеть, разрушается ли ледяной покров одновременно на всей площади контакта или нет. Максимальная частота отклика нагрузочных панелей может достигала 125 Гц, что позволяло измерять динамические силы льда. Кроме того, все панели были тщательно откалиброваны в лаборатории перед установкой на платформу. Для измерения вибрации структуры были использовались акселерометры. Одновременно в процессе взаимодействия ледового поля с сооружением велась регистрация давления льда на тензометрические панели, фиксировалась скорость ледового поля и отклонения сооружения, кроме того регистрировались ускорения верхней и средней частей основания и напряжения, возникающие в элементах его конструкции. Система компьютерного эквайринга позволяла вести непрерывную регистрацию (запись) всех датчиков одновременно без перерывов во время теста.

На рисунках 2.3.5,в,г из этой работы приведены фрагменты записей колебаний исследуемого сооружения, генерируемых дрейфующим ледовым полем при периодическом разрушении льда (утолщенная линия). Запись на рисунке 2.3.5,в дает представление о резонансном колебании опоры в такт с частотой разрушения льда. А на рисунке 2.3.5, г

можно видеть развитие вибрации сооружения после каждого акта разрушения льда при пилообразной ледовой нагрузке, характерной для небольших скоростей дрейфа ледовых полей.

По результатам анализа данных о взаимодействии нескольких сооружений различной конструкции с ледовыми полями исследователи подтвердили гипотезу ряда других авторов о существовании трех видов механизмов разрушения льда, включая «механизм переходного типа», вызывающий резонансный отклик конструкции сооружения. Кроме того, в работе [125] было предложено определять частоту разрушения льда с использованием «длины деформации ледового поля» (рисунок 3.1.7,а) по формуле

$$T = L_D \cdot V_{ice} , \quad (3.1.1)$$

где L_D определяется из соотношений для расчета относительной скорости ледового поля и сооружения (3.1.2) и для расчета скорости деформирования льда в сжимаемой зоне по Mishel et al. [68] (3.1.3).

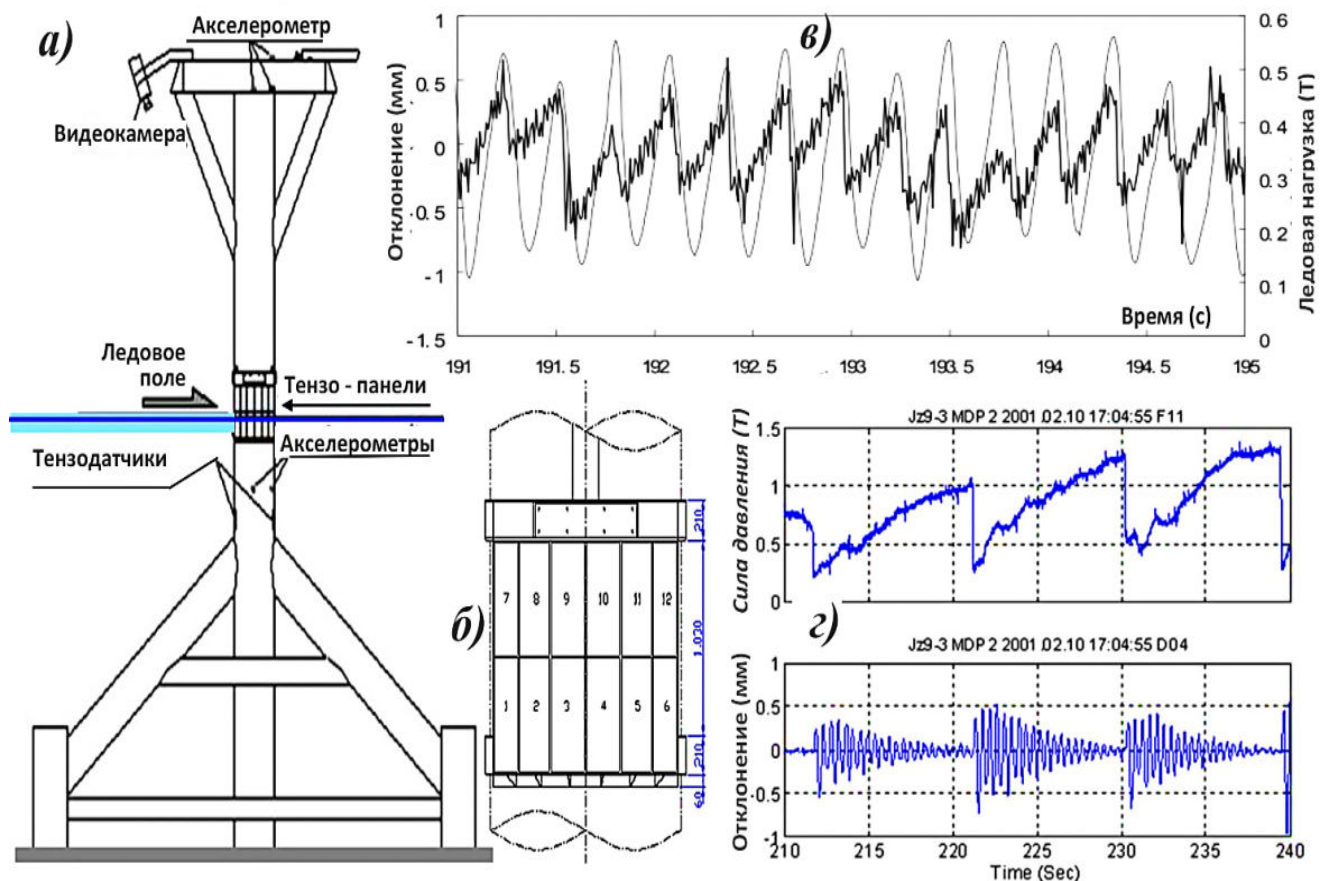


Рисунок 2.3.5 Исследования закономерностей возникновения циклических ледовых нагрузок на опору типа Монопод и колебаний сооружения с помощью тензометрических панелей в 2000 г. по Yue и др. [128]

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{V_r}{L_D} = -\frac{V_{ice}-V_r}{L_D}, \quad (3.1.2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_r}{4D}. \quad (3.1.3)$$

Авторы этих исследований проанализировали записи более 100 событий устойчивого состояния вибрации на трех разных сооружениях. Чтобы определить наиболее вероятный диапазон изменения скорости деформирования льда в зоне контакта. Ими были проанализированы, максимальные относительные скорости $V_{ice} - (V_{str})_{\text{Макс}}$ были заменены на V_r в уравнении (3.1.3), в котором V_{ice} является скорость льда и $(V_{str})_{\text{Макс}}$ амплитуда скорости структуры на уровне льда. Распределени скоростей деформации показано в виде гистограммы на рисунке 3.1.7,в. Можно увидеть, что все скорост деформации находятся в диапазоне $(1,2 \div 2) \times 10^{-3}$, который лежит в пределах зоны перехода от пластического типа разрушения льда к хрупкому.

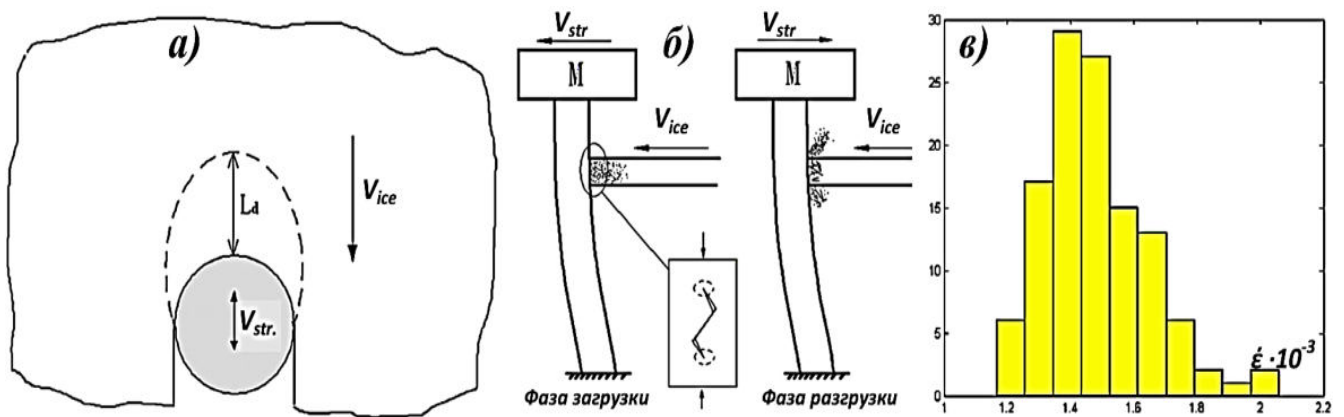


Рисунок 2.3.6 Длина разрушения ледовой плиты и схемы для расчета относительной скорости взаимодействия льда и сооружения, а также скорости деформирования льда по Yue и др. [125]

Авторы этих исследований пришли к заключению, что контактная сила должна быть функцией относительного смещения сооружения и относительной скорости между ним и кромкой ледового поля. Кроме того, в уравнении движения сооружения **не должно быть времени как явной переменной** [125,126, 128].

2.3.5 Исследования вибрации платформы Molikra в море Бофорта

По мере совершенствования и развития морских технологий в 1980-х годах, операции продвигались на север во все более сложные ледовые условия. За это время считалось что вопросы ПВ наиболее актуальны для узких структур, и этот вопрос в меньшей степени волнует широкие структуры. Это убеждение было оспорено зимой 1986 года, когда толстый многолетний лед в море Бофорта вызвал сильные ледовые колебания, приведшие к частичному разжижению песчаного основания под подошвой ледостойкой стационарной платформы кессонного типа Molikra.

Зимой 1985–1986 г. эта платформа, имеющая кессон массой в 54 000 т и габариты 111x111 м² в основании была подвергнута воздействию дрейфующего поля многолетнего льда размером 1x2 км [43,30,111]. Из анализа ситуации специалистами было установлено [188], что в результате вибрации с частотой 0,5–3 Гц, вызванной разрушением льда в течение 30-минутного контакта, платформа получила критическое состояние, близкое к потере устойчивости на сдвиг по поверхности грунта основания (Рис. 2.3.7). В течение одного из критических событий, длившегося в течение 4 минут с частотой около 1,4 Гц, были зарегистрированы пиковые амплитуды колебаний до 10 мм, [112].



Рисунок 2.3.7 Типичный случай разрушения (дробления со сколом) ледяного поля на платформе Моликпак (по Вершинину и др. [145])

Зимой 1985–1986 г. эта платформа, имеющая кессон массой в 54 000 т и габариты 111x111 м² в основании была подвергнута воздействию дрейфующего поля многолетнего льда размером 1x2 км [43,30,111]. Из анализа ситуации специалистами было установлено [188], что в результате вибрации с частотой 0,5–3 Гц, вызванной разрушением льда в течение 30-минутного контакта, платформа получила критическое состояние, близкое к потере устойчивости на сдвиг по поверхности грунта основания (Рис. 2.3.7). В течение одного из критических событий, длившегося в течение 4 минут с частотой около 1,4 Гц, были зарегистрированы пиковые амплитуды колебаний до 10 мм, [112]. Эти события создали значительные проблемы для эксплуатации платформы, которые в конечном счете привели к эвакуации платформы. Всеобъемлющий обзор этих ранних наблюдений

предоставлено Sodhi (1988), а результаты полномасштабных измерений на Molikrao широко обсуждались в сообществе инженеров-ледотехников [104,45].

ВЫВОДЫ по разделу 2.3

Из краткого обзора исследований параметров цикличности ледовой нагрузки на реальных сооружениях в натурных условиях следует, что **колебания сооружений возникают как реакция на разрушение льда на определенную глубину**. При небольшой скорости движения ледовых полей передача их кинетической энергии сооружению происходит в виде отдельных импульсов, вызывающих отклонение сооружения от положения равновесия с одновременным накоплением упругой потенциальной энергии в формирующемся в контактной зоне льда напряженном объеме. Разрушение льда в этом объеме «разгружает» его, передавая накопленную энергию на вновь образованные поверхности осколков и трещин в массиве льда, мгновенно освобождая опору сооружения от давления ледового поля на нее и она упруго, возможно с «переколебаниями», восстанавливает статическое равновесие, вытесняя продукты разрушения льда из зоны контакта. До нарастания нового контактного усилия нового может пройти время, определяемое скоростью ледового поля и глубиной разрушенной прорези во льду.

При высокой скорости ледовых полей, в зависимости от жесткости сооружения и прочности (жесткости) льда, переток кинетической энергии поля в потенциальную энергию сжатия объема льда с его последующим разрушением может привести к росту амплитуды отклонения сооружения (рис. 2.3.5,в) и повышению частоты разрушения льда. В случае, если частота разрушения льда, определяемая теми же параметрами, будет близкой к одной из частот собственных колебаний конструкции сооружения в ней могут возникать резонансные явления (Рис. 3.1.6,в), что может привести к потере его устойчивости или разрушению. Как показывает практика такие явления могут возникнуть на сооружениях с различной жесткостью конструкции при различных сочетаниях расчетных параметров, таких как толщина ледового поля, его скорость и прочность льда.

Результаты представленного анализа указывают на то, что главным направлением исследований должны стать исследования ***процесса взаимодействия ледового поля с сооружением во времени*** как взаимосвязанных элементов ***одной механической системы***, с учетом изменений кинематических и кинетических параметров ее элементов. Для формального (численного) описания этого сложного комплексного процесса необходимо систематизировать все его элементы, установив как их иерархию и взаимодействие, так и

последовательность протекания. *Наиболее приемлимым методологическим инструментом для такого описания является системный анализ.*

ВЫВОДЫ по материалам 2 главы

Морской лед, как деформируемое твердое тело, оказывающее мощное силовое воздействие на искусственные сооружения – физически очень сложный материал, представляющий собой **гетерогенную (многокомпонентную) систему**, элементами в которой являются кристаллы чистого льда; кристаллы различных солей; рассол (раствор солей в воде); поры воздуха, а также твердые или биогенные включения. Уникальное строение морского льда обуславливает его *необычные физико-механические характеристики*, поэтому изучением строения морского льда многие исследователи занимались с позиции решения инженерных задач. И поэтому также, для понимания механики разрушения морского льда очень *важно понять и оценить вклад в этот процесс именно строения морского льда: его текстуры и структуры.*

Несмотря на очень большое количество полученных данных по физико-механическим свойствам морского льда, **проблема «надёжности соответствия» его прочностных характеристик**, полученных при испытании образцов из него, **виду и критическим значениям прочности в контактной зоне** массива ледового поля все еще остается открытой.

Движущийся ледовый покров перед опорой *разрушается по двум основным типам: прорезанием и потерей устойчивости* ледового поля. Установлено, что контактная сила *при прорезании* льда всегда больше, чем при потере устойчивости пластины и поэтому **расчетным случаем всегда будет случай прорезания льда опорой, когда лед разрушается дроблением.**

Каждое нарушение сплошности массива льда в зоне его контакта с поверхностью индентора есть **результат реализации упруго накапливаемых в процессе воздействия во льду деформаций** в виде трещин, начиная от накапливающихся микротрещин и всех разновидностей, типов и видов трещин. Записи напряжений во льду перед опорой показывают, что итогом процесса упругого деформирования льда в начальной стадии нагружения часто становится спонтанное **образование горизонтальной, также как и вертикальной трещин.** Эти явления *«разгружают» ледовый покров: упругие напряжения в зоне контакта резко падают*, продолжение процесса загрузки ледовой плиты приводит к *следующим типам разрушения льда*, но уже при меньших значениях напряжений. Наибольшие нагрузки возникают при втором типе разрушения льда;

Частотные характеристики давления льда на опору находятся в сложной зависимости от скорости движения, толщины ледяного поля, жесткости льда и диаметра опоры.

Исследователи делают важный вывод о том, что с увеличением скорости движения и толщины ледяного поля уменьшается зона разрушенного льда перед опорой, что является одной из причин увеличения частоты циклического действия ледовой нагрузки.

Колебания сооружений возникают как реакция на разрушение льда на определенную глубину. При небольшой скорости движения ледовых полей передача их кинетической энергии сооружению происходит в виде отдельных импульсов, вызывающих отклонение сооружения от положения равновесия с одновременным накоплением упругой потенциальной энергии в формирующемся в контактной зоне льда напряженном объеме.

При высокой скорости ледовых полей, в зависимости от жесткости сооружения и прочности (жесткости) льда, переток кинетической энергии поля в потенциальную энергию сжатия объема льда с его последующим разрушением может привести к росту амплитуды отклонения сооружения (рис. 2.3.5,в) и повышению частоты разрушения льда. В случае, если частота разрушения льда, определяемая теми же параметрами, будет близкой к одной из частот собственных колебаний конструкции сооружения в ней могут возникать резонансные явления (Рис. 3.1.6,в), что может привести к потере его устойчивости или разрушению. Как показывает практика такие явления могут возникнуть на сооружениях с различной жесткостью конструкции при различных сочетаниях расчетных параметров, таких как толщина ледового поля, его скорость и прочность льда.

Из элементарного анализа всего комплекса трещин, их локации в зоне контакта, можно сделать понятный вывод о том, **что математически корректное описание комплексного процесса разрушения ледового поля на его контакте с сооружением с использованием существующих методов** описания напряженно-деформированного состояния массива материала и известных **силовых критериев** предельного состояния теории упругости на данном этапе **представляет большие, возможно - непреодолимые трудности.**

Поэтому главным направлением исследований должны стать исследования **процесса взаимодействия ледового поля с сооружением во времени** как взаимосвязанных элементов **одной механической системы**, с учетом изменений кинематических и кинетических параметров ее элементов. Для формального (численного) описания этого сложного комплексного процесса необходимо систематизировать все его элементы, установив как их иерархию и взаимодействие, так и последовательность протекания. *Наиболее приемлимым методологическим инструментом для такого описания является системный анализ.*

В качестве основной задачи в исследованиях циклического характера ледовой нагрузки на основания буровых платформ следует считать задачу **комплексного исследо-**

вания механизма генерирования циклического разрушения льда в условиях взаимодействия с опорой сооружения. Для получения адекватного описания параметров этого сложного динамического процесса необходимо выявить и исследовать параметр, интегрально отображающий весь комплекс деформаций в нагружаемом объеме льда и «запускающий» процесс разрушения при достижении предельного значения накопленной в сжимаемом объеме упругой энергии, т.е. сброса нагрузки на опору сооружения. Этот параметр должен рассматриваться в качестве энергетической эффективной прочностной характеристики динамического разрушения льда.

Цель, объект предмет и задачи исследования

Поскольку в настоящее время в мировой практике **нет единой модели расчетов циклической ледовой нагрузки** на морские сооружения, а существующие не обеспечивают адекватности в описании процесса взаимодействия ледовых образований с опорами шельфовых сооружений, высокие требования к их надежности и долговечности **обуславливают актуальность задачи получения надежного метода определения расчетных параметров цикличности ледовых нагрузок** от ледовых полей (ЛП) на морские ледостойкие основания (МЛО).

Выводы, полученные в результате анализа существующей проблемы указывают на назревшую необходимость *изменения концептуального подхода к ее решению путем разработки нового метода расчета ледовой нагрузки* на сооружения шельфа. Новый метод *должен базироваться на модели, описывающей процесс взаимодействия ледового поля с поверхностью сооружения во времени и с учетом механизма разрушения упруго сжатого объема льда, разгружающего этот объем в момент сброса упругих деформаций* при достижении в нем *предельного значения упруго запасенной энергии, являющегося критерием объемного разрушения льда*.

Такой метод должен обеспечивать не только получение расчетных значений максимальных нагрузок, адекватных реальным фактическим, но и их изменения в процессе контактного взаимодействия, что должно стать основой расчета амплитуд и периодов колебаний сооружения от воздействия льда при его циклическом разрушении. Это предопределяет основные векторы настоящего исследования: ЦЕЛЬ, ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ исследования проблемы.

ЦЕЛЬЮ работы является разработка научно-обоснованной методологии определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки в системе «Ледовое поле - МЛО», основанной на использовании результатов современных теоретических

и экспериментальных работ по механике разрушения материалов и в максимальной степени учитывающей мировой опыт в этой области знаний для обеспечения требуемого уровня проектной надежности расчетов циклической ледовой нагрузки для обеспечения долговечности и безопасности МЛО.

Методология определения ледовой нагрузки на МЛО в работе рассматривается как процесс получения решения проблемы и включает: разработку динамической имитационной модели циклического контактного разрушения льда, использующей энергетический критерий его разрушения; способ получения этого критерия тестами льда в массиве или на образцах; метод получения расчетных параметров для вычисления ледовой нагрузки на МЛО (максимального значения контактной силы и ее частоты); метод верификации расчетных параметров ледовой нагрузки.

Объектом исследования в работе является механизм циклического разрушения льда, который рассматривается как процессор в Системе «Ледовое Поле – МЛО», генерирующий циклическую ледовую нагрузку и обеспечивающий порционное расходование кинетической энергии ЛПП с равнозначными ее затратами на упругое отклонение конструкций МЛО и на разрушение льда в процессе их взаимодействия.

Предметом исследования является энергетическая прочностная характеристика льда: эффективная удельная энергия механического разрушения - $\epsilon_{ст}$, являющаяся регулятором как продолжительности циклов разрушения льда, так и ее амплитуды – базовых расчетных параметров ледовой нагрузки на МЛО.

В качестве основных в диссертации, с учетом данных аналитического обзора работ по проблеме, сформулированы следующие комплексные задачи исследований:

- выполнить теоретическое и экспериментальное изучение механизма разрушения льда, как структурно–неоднородной дефектной среды, обладающей широким спектром деформативных свойств в рассматриваемом диапазоне условий задачи;
- выполнить комплексный анализ современных моделей контактного разрушения льда на поверхности сооружения и синтезировать базовую концептуальную модель для описания циклического разрушения льда;
- выполнить системное исследование функционирования системы «Ледовое поле – МЛО» в процессе взаимодействия ее элементов;
- сделать теоретический анализ и выполнить численное моделирование особенностей механизмов образования и развития трещин и их природы в торцевой грани ЛПП и в массиве льда от внедрения в него вертикальной цилиндрической жесткой поверхности опоры МЛО;
- выполнить экспериментальное исследование механизма разрушения локальной области ледового поля и механизма разрушения льда в массиве ледяной плиты в поле

сжимающих контактных нагрузок от жесткой вертикальной цилиндрической поверхности опоры МЛО;

- исследовать теоретически и дать экспериментальную оценку эффективности факторов, оказывающих влияние на процессы формирования **параметров одиночного цикла разрушения льда** для условий задачи взаимодействия ледового поля с МЛО;

- выполнить теоретическое **обоснование нового метода** определения расчетных значений параметров для вычисления ледовой нагрузки на МЛО (максимального значения контактной силы и ее частоты) с использованием в качестве энергетического критерия объемного механического разрушения льда – **эффективной удельной энергии механического разрушения льда E_{cr}** ;

- выполнить физическое моделирование для разработки адекватного и эффективного **способа определения энергетической характеристики механической прочности льда E_{cr}** , с использованием известных и новых методов для определения этой характеристики доступными средствами;

- разработать рекомендации по применению удельной энергии механического разрушения льда для определения расчетных значений максимального значения контактной силы и ее частоты для вычисления ледовой нагрузки на МЛО.

ГЛАВА 3 Системно – методологический анализ макромеханических закономерностей циклического разрушения морского льда при взаимодействии с опорами гидротехнических сооружений

3.1 Системно– методологический анализ процесса взаимодействия ЛП с МЛО и определение места и роли критерия разрушения льда в формировании циклического характера ледовой нагрузки

3.1.1 Системный подход к исследованию процесса взаимодействия ЛП с МЛО

Во всех методиках рассматриваемых расчетов всегда исходят из того, что освоение шельфа может быть достигнуто созданием стационарных уникальных конструкций, обладающих высокими жесткостью, устойчивостью и обеспечивающих за счет этого **«прорезание»** льда в месте контакта кромки ЛП с опорными элементами МЛО. Этот подход оправдан построенными и относительно стабильно функционирующими МЛО на шельфах ледовитых морей (см. гл.1), которые были запроектированы с применением существующей концепции *непрерывного разрушения льда, постоянство расчетного значения контактной силы* принятого для кинетических и кинематических параметров «расчетного ЛП». Поэтому, учитывая выявившиеся в процессе эксплуатации таких сооружений опасные явления вибрации, угрожающие их целостности и устойчивости, в рамках этого подхода часть элементов *существующей методологии* следует оставить в качестве основы новой методологии (Рисунок 3.1.1), которую необходимо строить также на анализе явления «прорезания» ледового поля опорой сооружения.

Но, для описания явления циклического характера ледовой нагрузки на сооружение при прорезании им ледовых полей как механического процесса, необходимо вводить параметр «время» – как естественную шкалу регистрации последовательности наступления описываемых элементов процесса, таких как: фазы роста и сброса контактных сил; нарастание контактных давлений; момент начала образования трещин и пр. Количественные параметры процесса силового взаимодействия ЛП и МЛО в реальном времени можно получить только из решения уравнения энергетического баланса. Для составления такого уравнения следует рассмотреть совместную работу ледового поля, обладающего запасом кинетической энергии и неподвижного сооружения, обладающего упругой податливостью. Таким образом, возникает необходимость разработки и использования новой в данной

области энергетической концепции определения неизвестных расчетных параметров процесса взаимодействия ЛП с МЛО для применения их в расчетах ледовой нагрузки на сооружение.

Для построения *новой общей методологии проектирования ледостойких сооружений в части определения ледовых нагрузок* [135], так же как и для качественных оценок неизвестных параметров процесса взаимодействия ЛП с МЛО, используем **системный подход** [5,50,86,]. Впервые совокупность **ледовое поле - сооружение** предложил рассматривать как единую «*систему*» К.А. Blenkarn в 1970 г. [163], что в последующем было поддержано и многими другими исследователями [181,250,284,345,92,380,385, 383,21], пытавшимися обосновать возможность возникновения автоколебаний и резонанса в данной *системе* со ссылками на теорию колебаний.

Для анализа сложившейся методики расчета ледовой нагрузки на сооружения используем **системный анализ** [86] в качестве *методологической основы и инструмента* феноменологического, конструктивного и функционального анализа взаимодействия совокупности объектов Ледовое Поле и Морское Ледостойкое Основание, *предварительно определив*, что эта совокупность является **Системой**.

Характерно, что до настоящего времени не предложено *расчетной модели процесса формирования ледовой нагрузки*, адекватно учитывающей все аспекты процесса взаимодействия сооружения с кромкой ледового поля, поскольку этот процесс **системно не анализируется**.

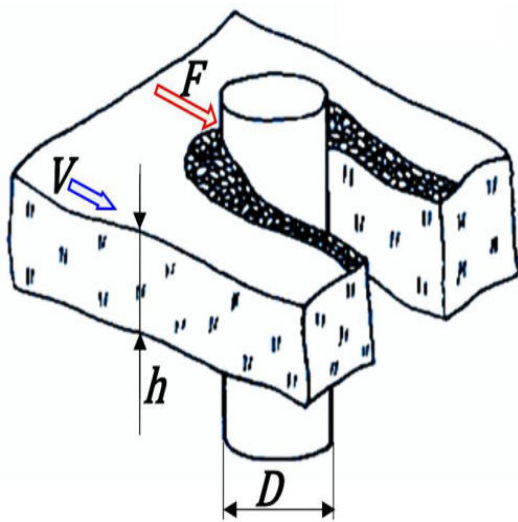


Рисунок 3.1.1 Основные параметры взаимодействия ЛП с МЛО

Не рассматривались и не описывались элементы системы, ее *цель* и *системообразующая функция*, *баланс энергии ледового поля и сооружения в процессе их взаимодействия*, работа контактного разрушения льда, отклонения сооружения и пр. Более того, как показано в первой главе, метод определения предела прочности льда существует как самостоятельная процедура, а результаты испытаний образцов «вставляются» в абстрактную формулу контактного давления пластины ледового поля, не являющуюся описанием процесса взаимодействия ЛП и МЛО.

Системный подход в данном исследовании направлен на детальное, поэлементное и поэтапное рассмотрение модели совместной работы *массива льда* у кромки ледового поля, как деформируемого твердого тела, *опорных элементов сооружения*, включая *грунтовое основание*, как деформируемой конструкции. Цель исследования совместной работы тела из природного материала и искусственной конструкции - определить *взаимное влияние* на этот процесс всех параметров *на Входе* в

систему ЛП – МЛО: всех *характеристик и ЛП, и МЛО*. К таким параметрам, прежде всего, следует отнести *кинематические факторы ЛП*: геометрические размеры (площадь поля Ω и его толщина h); его массу ($M_{лп}$); скорость движения ($V_{лп}$), а к *расчетным параметрам опоры* – размер (D) и массу платформы ($M_{мло}$), форму опоры (m) и ее податливость (гибкость λ), и др. Важнейшим параметром процесса является прочность (жесткость) льда (R_{ice}).

Для возможности использования всех принципов и приложений *системного подхода*, как методологии проектирования [5], необходимо доказать, что во взаимодействии с окружающей средой [135], в которой сооружение должно функционировать по своему предназначению – эксплуатироваться в условиях воздействия ледовых полей, *совокупность объектов ЛП – МЛО* является сложной искусственной природно - технической *Системой* взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем и элементов [135], рассмотренных ниже (Рисунок 3.1.2). Результаты применение системного подхода к построению *новой методологии расчета ледовой нагрузки* позволят установить взаимосвязи и *взаимное соответствие всех моделей, методов и расчетных величин* как *параметров выхода* системы взаимодействующих элементов ЛП и МЛО, что должно стать обоснованием для построения *новой методологии расчета ледовой нагрузки*. Основой для синтеза новой методологии должны стать результаты решения трех основных задач системного анализа: *декомпозиции* системы, ее целей, структуры, функций, факторов и неопределенностей; структурного, функционального, конструктивного *анализа* системы; структурного и параметрического *синтеза* новой модели системы.

3.1.2 Дескриптивное описание совокупности объектов «ЛП – МЛО» как Системы (структура, назначение, цель существования)

Рассмотрим реально существующую совокупность объектов ЛП – МЛО на предмет ее соответствия всем определениям Системы (Рисунок 3.1.2). Это необходимо для удостоверения правомерности ее исследования в качестве Системы методами системного анализа с целью решения рассматриваемой проблемы расчетов параметров цикличности ледовых нагрузок на морские отдельно стоящие сооружения путем синтеза адекватной модели циклического разрушения льда.

Следуя *цели возведения* искусственного сооружения на морском шельфе в высоких широтах для добычи углеводородов, главным проектным свойством такого сооружения должно быть *целевое свойство ледостойкости*. То есть, МЛО должно *надёжно*

функционировать во времени¹ в тяжёлых условиях его эксплуатации: разрушать дрейфующие ледовые поля (ЛП), оставаясь не только устойчивым и неразрушенным, но и обеспечивающим бурение скважин, откачку и первичную обработку нефти (газа) в штатном режиме силового воздействия ледовых полей, дрейфующих под действием течений и ветра и обладающих огромной *кинетической энергией*, которые не могут быть остановлены никакими искусственными точечными сооружениями.

Ранее Ледовое поле и Морское ледостойкое основание, как *совокупность взаимодействующих объектов* (ЛП–МЛО) и все процессы, генерируемые ими и протекающие *внутри этой совокупности* (Рисунок 3.1.2), как одно целое и только в совокупности, только во взаимосвязи друг с другом – *не рассматривались*.

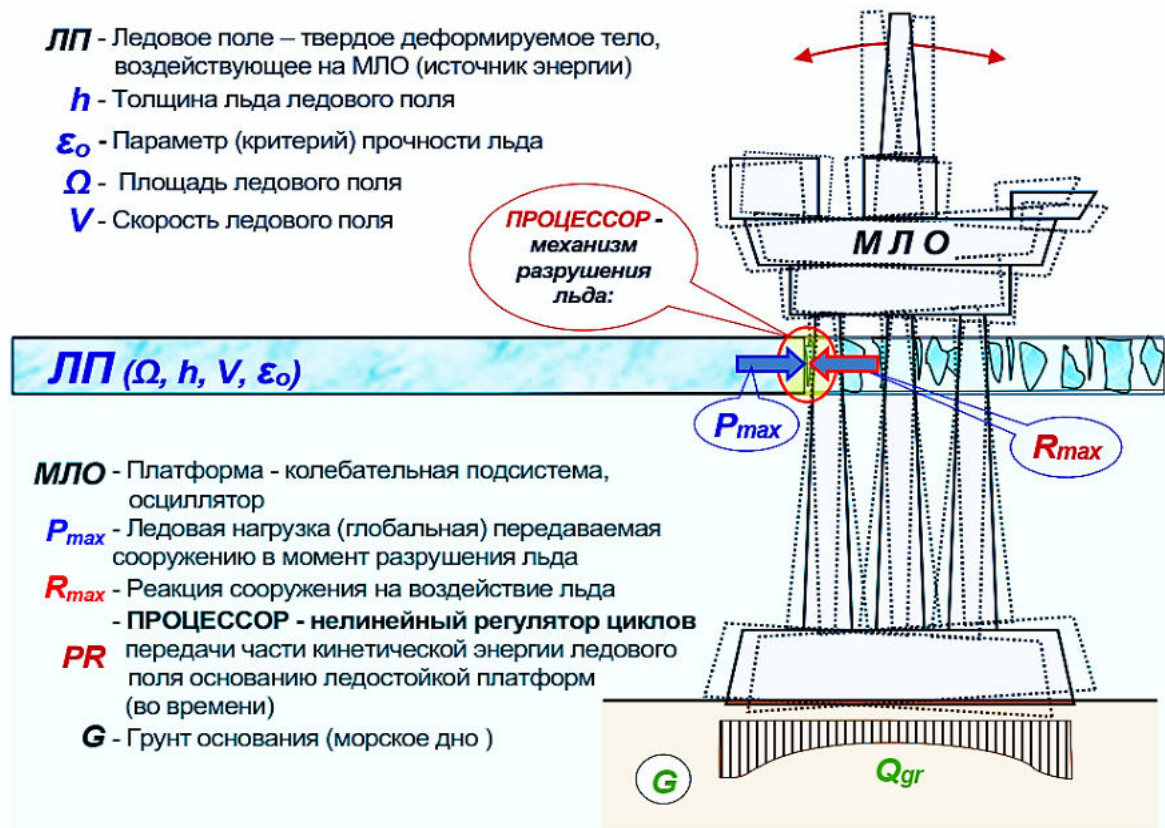


Рисунок 3.1.2 Феноменологическое представление совокупности объектов ЛП — МЛО как Системы

В настоящее время уже реально существуют и эксплуатируются ледостойкие основания маяков на Балтике, платформ ферменного типа в Бохайском заливе, несколько морских ледостойких оснований, работающих в тяжелых ледовых условиях (платформы Приразломная, Беркут, Орлан и др.). На основании данных многих исследований [152,163,217,180,278,306,310,322,382,306,59,60], также как и исследования прорезания натурного [157,173,222,362,373,57] и моделированного льда моделями опор в ледовых

¹Слова "во времени" означают естественный ход времени, а не какой-либо конкретный интервал времени.

бассейнах [195,278, 313,374,381,9,9717,26, 70,89] показывают, что эта совокупность элементов обладает свойством *«прорезания»* льда в месте контакта кромки ЛП с опорными элементами МЛО, т.е. эффект *«ледостойкости»* МЛО имеет место в реальных процессах.

На основании данных указанных исследований *считаем установленным*, что исследуемое здесь явление *взаимодействия совокупности* элементов Системы (ЛП–МЛО) (Рисунок 3.1.2) образуют единое целое и связаны двояко-единым физико-механическим процессом разрушения льда (элемент – Ледовое поле), порождающим колебания ледостойкого сооружения (элемент МЛО). Это однозначно доказывает, что процесс послойного *циклического разрушения льда*, обеспечивающий «прорезание» опорой МЛО ледового поля является *интегративным свойством* совокупности «ЛП – МЛО», не выявляемом при поэлементном исследовании каждого из этих объектов.

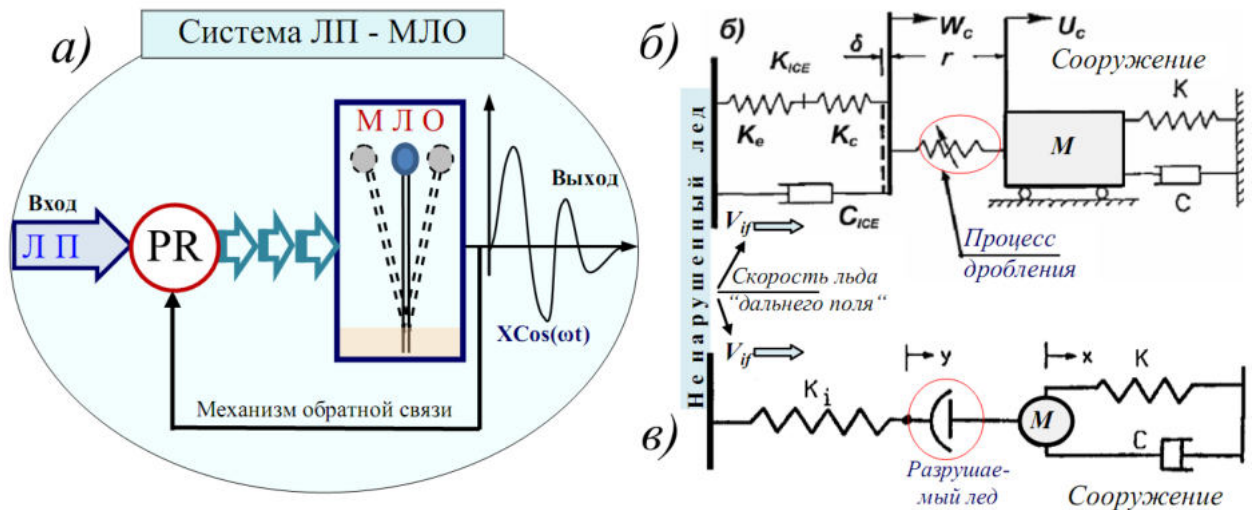
Как и всякая другая, разрабатываемая для решения обозначенной проблемы система ЛП – МЛО должна иметь конкретную *цель*. В данном случае цель системы не может быть «внутренней», обеспечивающей ее самофункционирование, она задается разработчиком проекта морского ледостойкого основания буровой платформы, например. Проектировщика интересует решение вопросов по обеспечению стабильного проектного состояния системы ЛП – МЛО, которая должна надежно и бесперебойно работать в ледовых условиях. Поэтому *цель рассматриваемой системы*, как желаемое, проектное ее состояние, задается целью Проекта: придать сооружению *свойство ледостойкости*. Важно, что непротиворечивость целей основных элементов системы ЛП и МЛО подтверждает, что их совокупность действительно можно считать системой: цель ЛП – движение; цель МЛО – устойчивое положение на грунте под действием гравитации.

Значит рассматриваемая упорядоченная совокупность элементов «ледяное поле – МЛО» [135], обладающая *свойством ледостойкости МЛО* с учётом принципа интегративности [50,5] *может и должна рассматриваться как Система*, обладающая не только направленным, но и *полезным эффектом*, а именно – *удовлетворением исходной потребности* устойчивого состояния: *прорезание дрейфующих ледовых полей* [105].

Феноменологически *цель системы* ЛП – МЛО описывается так: обеспечение непрерывного разрушения льда в течение всего времени воздействия дрейфующих ледовых полей на опоры основания сооружения. Главное условие достижения системой ее цели – она *должна находиться в "области достижимости"*, т.е. проектная жесткость сооружения *всегда* должна превышать жесткость ледового поля (льда): условно $R_{max} > P_{max}$.

3.1.3 Структурно – функциональный анализ системы ЛП – МЛО

Структурный анализ [105,50,86] этой сложной совокупности элементов



показывает, что она состоит из нескольких элементов (*подсистем*), взаимодействующих между собой (Рисунок 3.1.2). Одним из таких элементов является *Ледовое поле* (ЛП), имеющее плавучесть и перемещающееся в горизонтальном направлении под действием другого элемента – *внешней среды* (таких ее составляющих, как ветер и течения). Другими элементами являются: рассматриваемое *Сооружение - МЛО*, а кроме того, еще *Водная среда*, в которой сооружение расположено; *грунтовое Основание*, составляющее базу для установки сооружения на дно.

Учитывая, что в данном исследовании нас интересует проблема обеспечения *стабильного состояния* конкретной совокупности объектов «ЛП – МЛО», являющейся подсистемой общей системы расчета ледовой нагрузки, средой, воздействующей на данную совокупность объектов, будут водная и воздушная среда, а также грунт основания. Эти же среды воспринимают воздействие совокупности объектов ЛП–МЛО.

Функционирование рассматриваемой сложной совокупности элементов обеспечивается реализацией связей между ними: между ледяным полем и опорами сооружения; между опорами сооружения или его опорной плитой и грунтом основания, между сооружением и водной средой. При этом каждый из элементов в рассматриваемой совокупности обладает присущими только ему и только в каждый конкретный отрезок времени феноменологическими свойствами, обуславливающими уникальность протекающих в них процессов в период их взаимодействия.

Функциональная модель принципа действия основных элементов Системы ЛП – МЛО представлена на Рисунке 3.1.3. **Функционирование системы** происходит в виде работы процессора (PR) в качестве преобразователя *кинетической энергии* движущегося ледового поля (ЛП) в другие виды энергии: *поверхностную энергию* блоков, обломков и крошки разрушенного льда в *массиве ледового покрова* в объеме образующейся прорези ледового поля, а также в упругую энергию *отклонения* МЛО.

Рисунок 3.1.3 Модели взаимодействия ЛП с МЛО: а) функциональная модель принципа действия элементов Системы ЛП – МЛО; б) – по Kärnä M. и Turunen

К. [248]; в) – по Singh S.K. и др. [340]

В зависимости от ряда кинематических, кинетических, геометрических, физико-механических параметров ледового поля и льда, а также геометрических размеров сооружения и его жесткости, регулирующих характер процесса взаимодействия, вид выходного сигнала – среднее значение контактной силы, относительно *постоянного значения ее амплитуды или ее пиков и их частота* будет различным: от практически постоянного значения без заметных колебаний до пилообразной кривой с одинаковыми или изменяющимися амплитудами и частотами (Рисунок 3.3.8)

На основании проведенных декомпозиции структуры и функции существующей системы **цель проектирования** (назначение) новой системы, можно оставить прежней: *сохранение устойчивого состояние её основного свойства – функционирования в непрерывном режиме в течение всего времени воздействия ледяного поля на сооружение* при изменении воздействий на входе системы в определённых пределах. В сфере прикладного использования системы целью является безопасная *бесперебойная эксплуатация технологического оборудования буровой платформы, обеспечивающая добычу нефти и газа на шельфе* в условиях воздействия дрейфующих ледяных полей.

Таким образом, устойчивое состояние основания буровой платформы обеспечивается «прорезанием» опорой льда дрейфующего ЛП – это условно непрерывный во времени и в массиве ЛП **процесс разрушения льда** на контакте с поверхностью опоры МЛО, на который **затрачивается часть энергии ЛП**. Следовательно, *процесс разрушения льда* при прорезании опорой ледового поля – это *системообразующая функция* таких сооружений [135], для реализации которой они проектируются и возводятся.

3.1.4 Конструктивное описание системы «Ледовое поле — МЛО»

Учитывая полученный вывод о том, что совокупность «ледовое поле – МЛО» в целях анализа её совместного функционирования может исследоваться как система, понятие «надёжность проекта МЛО» должно быть рассмотрено с учётом не только *феноменологических* особенностей (назначение, цель существования, целевая функция), но и *конструктивных* (строение, состав, устройство) системы ЛП – МЛО. В дальнейшем нашем исследовании, в целях анализа совместного функционирования элементов системы ЛП–МЛО, рассмотрено её **конструктивное определение** с помощью содержательных и пространственно-временных координат [105].

Как всякая техническая система, система ЛП-МЛО может быть конструктивно определена как **единство входа, выхода и процессора (PR)** (Рисунок 3.1.3) [50], предназначенных для упорядоченной реализации определённой функции по достижению **цели системы** – сохранению или изменению её основного свойства. В рассматриваемом случае **основными интегративными свойствами системы** являются:

- **разрушение льда** в виде смятия и выжимания крошки и мелких обломков из зоны контакта, либо в виде развития системы трещин и образования крупных и мелких обломков в результате работы деформирования некоторого объема льда в зоне контакта кромки ледового поля с поверхностью с одной из опор МЛО, равной затраченной на эту работу части энергии движущегося ледового поля;

- **отклонение сооружения:** упругое (возможно – знакопеременное) деформирование его конструкции при **передаче ей части энергии движущегося ледового поля** в виде давления льда с относительно **постоянным его значением** или в виде **периодически повторяющихся пиков ледовой нагрузки**, имеющих различные или неизменные значения **по величине и частоте**.

Входом в систему является её элемент «ледяное поле», его функция - воспринимать воздействие внешней среды (Рисунок 3.1.2). К конструктивным особенностям ледяного поля следует отнести его плоскую форму, скорость V_l , размеры в плане Ω , толщину h_l и прочность льда σ_l . Под входным воздействием среды в данном случае следует обозначить: вещественные компоненты: скорости ветра V_v и течения V_m , сообщающие движение ледяному полю со скоростью V_l ; воздействие воды, обеспечивающей плавучесть и оказывающую гашение скорости ледяного поля; температуру воздуха $T^{\circ}C$, под воздействием которой охлаждается вода и образуется ледяной покров той или иной **толщины** и набирает определённую **прочность** лёд.

Выход системы – те элементы морского ледостойкого основания, или их части, которые передают **выходные воздействия** системы в окружающую среду. Выходными воздействиями системы на среду в рассматриваемом случае будут обломки ледяных полей на поверхности моря; колебания всей конструкции МЛО; упругие волны, возникающие в воздушной и водной среде при колебаниях МЛО; изменения в распределении давления опорной плиты МЛО на грунтовое основание дна; шум, создаваемый разрушающимся льдом (Рисунок 3.1.2).

Основными **выходными параметрами** процесса преобразования энергии в данном случае являются значение **пикового контактного усилия** (при хрупком разрушении льда) на поверхности опоры МЛО – P_k и **период цикла разрушения льда** T_u (он же - период вынужденных колебаний сооружения).

В процессе функционирования системы входные воздействия преобразуются в выходные посредством **процессора** – средства, обеспечивающего такое преобразование [50].

В общем случае процессор представляется как единство трёх составляющих: *оснащения, упорядоченности и катализатора*. Ответом на вопрос о месте расположения процессора является результат феноменологического анализа процесса преобразования энергии одного из элементов системы - движущегося ЛП, в энергию разрушения льда с помощью другого элемента системы – МЛО. **Процессор должен и пространственно и функционально находится между ними** (Рисунок 3.1.2).

Конструкция МЛО, его неизменные параметры, такие как: высота опор, их форма, размеры и материал из которого они изготовлены; масса сооружения; жёсткость каркаса сооружения и ряд других параметров - это **оснащение процессора** и для конкретного сооружения оно остается постоянными на весь период его службы. Таким образом, *оснащение процессора* обеспечивает функционирование данной системы: **преобразование входных воздействий в выходные, то есть - разрушение льда**.

3.1.5 Процессор – механизм разрушения льда – объект исследования

По определению – порядок разрушения льда по одному из видов (типов) разрушения – это **механизм разрушения льда** [132,124,126]. Следовательно, **процессором в системе «Ледовое поле – МЛО» является механизм разрушения льда** – свойство Системы разрушать структуру льда в строго определённом порядке в результате разрыва её внутренних связей под действием напряжений, создаваемых в них внешним силовым воздействием. Это свойство системы имеет место при воздействии ледовых полей на сооружения как с податливыми узкими опорами, так и с широкими стенками.

Здесь следует заметить, что для изменения скорости, интенсивности и качества преобразований энергии движущегося ледового поля в энергию разрушения льда отдельные параметры элементов системы – **катализаторы процессора** могут изменяться (при **вариантном проектировании**) или могут задаваться конкретно.

Как один из катализаторов можно рассматривать форму опоры, а другие – количество опор и размер одной опоры. Например, разрушение льда у опоры конического типа будет происходить при достижении предельной стрелки прогиба ледового поля, напользающего на поверхность опоры. При опорах с острой режущей гранью возможно раскалывание льдины. Ледовое поле из тонкого льда, движущееся под напором ветрового потока, может потерять устойчивость при изгибе, «упершись» в широкую опору сооружения. Разрушение ледового поля также может происходить в виде разрушений местного характера («смятием») на контакте его кромки с опорной конструкцией сооружения.

Функционирование единого процесса взаимодействия ЛП с МЛО состоит в одновременном развитии двух ее основных эмерджентных свойств: **субпроцессов** первого уровня: деформирования локального объема льда в торцевой грани ледового поля и упругого

отклонения сооружения от положения равновесия. Между началом процесса взаимодействия ледового поля с сооружением и его окончанием в рассматриваемой природно-техногенной системе эти два свойства проявляются в виде циклически повторяющихся субпроцессов второго уровня. Первым является **субпроцесс разрушения льда**, вторым – субпроцесс вынужденных колебаний сооружения, частота которых регулируется **частотой разрушения льда**.

Как ранее нами было показано, нагрузка на ледостойкое сооружение определяется значением контактной силы, совершающей работу по разрушению льда на контакте ЛП с МЛО. Внешними «материализованными» проявлениями механизма разрушения льда являются **продукты разрушения льда**:

- крошка и мелкие осколки кристаллов льда, смятого жесткой внедряющейся в торец ледового поля поверхностью опоры сооружения – при теплом льде и его **разрушении по вязкому типу**;

- вертикальные и горизонтальные трещины нормального отрыва или трещины сдвига, поглощающие **упруго накапливаемую энергию** нагруженного массива льда.

Порядок работы процессора системы «ЛП – МЛО», то есть порядок разрушения льда на контакте его с опорой сооружения, как уже было показано, феноменологически определяется **случайным образом** сочетанием параметров, не только характеризующим физико-механическое состояние массива льда и ЛП, но и таких факторов как форма опоры и ее размер. В конечном итоге и «искомая» расчетная жесткость опор сооружения, их количество и расположение в плане также имеют существенное влияние на механизм разрушения ледового поля и льда в массиве.

Поэтому процессор системы «ЛП – МЛО» - механизм разрушения льда играет определяющую роль в расчётах ледовой нагрузки на МЛО и при его проектировании важно рассмотреть все возможные модели взаимодействия и, следовательно – критерии разрушения льда, и выбрать ту модель механизма разрушения, которая, адекватно отображая процесс разрушения льда в натуре, покажет наибольшее значение ледовой нагрузки, которую и следует принять за расчетную, но при этом ее значение будет включать нормированные показатели надежности принятого решения (Рисунок 3.1.4).

Работе контактной силы по сжатию локального объема льда противодействует жесткость структуры льда (Рисунок 3.1.2), в каждую единицу времени в сжимаемом массиве льда растет плотность упругой энергии, и, при достижении ее критического значения в сжатом локальном объеме льда в зоне контакта произойдет его разрушение, что вызовет сброс ледовой нагрузки на сооружение и начнется его движение обратно к точке равновесия. При этом контактная сила нарастает до определенного максимума, затем «сбрасывается» до некоторого минимума в момент начала разрушения льда.



Рисунок 3.1.4 Место «процессора» - механизма разрушения льда, и его роль в определении ледовой нагрузки на МЛО в системе элементов проектируемой методологии обеспечения надежности и долговечности морского ледостойкого основания (МЛО)

Но, поскольку движение ЛП продолжается, процесс взаимодействия ЛП с МЛО в виде циклов «нагрузка – сброс» (отклонение МЛО – возврат) *повторяется* до прорезания сооружением всего ледового поля. То есть *сброс нагрузки является источником колебаний* сооружения. Частота субпроцесса вынужденных *колебаний сооружения*, таким образом, регулируется частотой *разрушения льда*. Триггером начала разрушения льда в каждом цикле является *критерий разрушения льда*, который является основным элементом исследуемого *объекта исследования* – механизма разрушения льда, запускающим процесс разрыва внутренних связей в его структуре, что приводит к развитию сдвиговых или нормальных трещин, разрушающих его структуру.

Методологически определение ледовой нагрузки на такое сооружение является частью системы проектирования (Рисунок 3.1.4), которая должна адекватно сочетать *методы расчета и согласующиеся с ними методы определения критерия прочности льда* и материала конструкции МЛО, соответствующих этим расчетам на основе имеющихся норм, либо на основе *исследования нового критерия как явления* [5, 86]. Поэтому, основным расчетным параметром в определении ледовой нагрузки на МЛО является *критерий разрушения льда R_{cr}* . Очевидно, что от полноты *соответствия метода определения этого критерия* при испытаниях льда на прочность, то есть от адекватности этого метода природе разрушения массива льда в торцевой грани ЛП, зависит *уровень достоверности всей методологии проектирования МЛО*.

Выполненные этапы системного анализа функционирования совокупности объектов Ледовое Поле и Морское Ледостойкое Основание, как сложной природно-технической системы, позволяют сформулировать в качестве *результатов ряд ранее не конкретизированных положений рассматриваемой проблемы.*

1. Дрейфующее ЛП может обладать колоссальной кинетической энергией УЛП, принимая своими нижней и верхней поверхностями воздействие сил морских течений, приливов-отливов и ветра. Функциональная модель принципа действия Системы ЛП – МЛО представленная на рисунке 2, демонстрирует процесс преобразования массива льда (ЛП – как материальной основы Системы) в его обломки и колебания МЛО «через механизм разрушения льда» (**PR**) посредством затрат кинетической энергии ЛП для достижения цели Системы – устойчивого состояния (ледостойкости). Естественно, что движение и взаимодействие всех элементов, составляющих явление разрушения льда, должно описываться законами механики, прежде всего – законом сохранения энергии.

2. Конструкция МЛО, его неизменные параметры, такие как: высота опор, их форма, размеры и материал из которого они изготовлены; масса сооружения; жёсткость каркаса сооружения и ряд других параметров для конкретного сооружения остаются постоянными на весь период его службы. Но размеры ледовых полей, их скорость и толщина, прочность льда – являются случайными величинами. Поэтому *постоянство вида разрушения льда, форм и спектра частот колебаний МЛО*, т.е. *упорядоченность преобразования входных воздействий в выходные*, будут иметь место только в пределах каждой конкретной комбинации указанных случайных величин.

3. Следовательно, основная функция процесса *механического разрушения льда* – *дозирование диссипации энергии* в системе «ЛП – МЛО». Значит, *механизм разрушения льда* – это не элемент системы, это ее *основная функция*, отражающая ее основное предназначение и которая не является функцией ни одного из ее элементов. Этот феномен, не является материальной субстанцией, это – явление периодического высвобождения энергии упругих напряжений в массиве льда, накапливаемой им в зоне контакта.

4. В каждом конкретном случае взаимодействия ЛП и МЛО эта *энергия преобразуется как в поверхностную энергию* материальных элементов (осколки и блоки, крошка смятого льда, трещины различной природы и т.д.), так и *затрачивается на работу* в процессах появления, развития, перемещения и удаления из зоны контакта этих физических тел во времени. Учитывая это, можно констатировать, что *результат расчета срока службы ледостойкого сооружения с определенной вероятностью обеспечения его надежности* будет обусловлен, в основном, *адекватностью математического описания процесса разрушения льда на его контакте с опорой сооружения, также как и надежностью определения расчетного параметра прочности льда, его соответствия выбранной гипотезе*

механики разрушения льда, то есть – адекватностью применяемых средств и методов определения критерия прочности льда (Рисунок 3.1.4).

5. Выбор этого параметра можно произвести по двум основным критериям [43]: по объему необходимой и достаточной для развития процессов деформирования и разрушения льда работы (энергетические критерии), или - по использованию предельных значений жесткостных и напряженно-деформационных параметров льда (группа силовых критериев).

6. Следующим этапом работы должна стать разработка а алгоритмов (далее – моделей), описывающих процесс прорезания ЛП опорами МЛО как через *механизмы непрерывного разрушения* и выдавливания разрушенной массы льда из зоны перед поверхностью опоры, так и через *механизмы «циклического разрушения»* льда, происходящего в результате разгрузки накопленной в контактной зоне льда потенциальной упругой энергии его деформирования. Но во всех таких *моделях преобразования энергии* всегда существует «механизм сбрасывания» накопленной до критического значения упругой энергии U_{cr}^* для конкретного деформируемого объема льда.

Таким образом, возникает необходимость разработки и использования новой в данной области *энергетической концепции определения неизвестных расчетных параметров* процесса взаимодействия ЛП с МЛО для применения их в динамических расчетах ледовой нагрузки на сооружение. К ним относятся такие характеристики *циклического процесса разрушения льда*, как значения пиков ледовой нагрузки, так и их частота. Получение этих характеристик возможно только при использовании энергетического критерия разрушения льда, вид и место которого надлежит определить в отдельном исследовании.

3.2 Концептуальные подходы к выбору модели взаимодействия ЛП с МЛО с учетом механизма циклического разрушения льда

В практике проектирования ледостойких платформ, работающих в ледовых условиях на шельфе, главной задачей проектировщиков является достижение комплексной цели – создания надежного проекта МЛО, которое будет безопасно функционировать в течение всего проектного срока его эксплуатации. Условием надежности ледостойкого сооружения является условие его стабильного состояния в процессе динамического воздействия на него ледовых образований, то есть нормального рабочего функционирования промышленного оборудования, расположенного на платформе и безопасных условий для персонала. Это достигается нормативным запасом прочности и устойчивости сооружения над его расчетными показателями, определяемыми в результате динамического расчета конструкции на воздействие циклической ледовой нагрузки.

Учитывая уникальность и стоимость такого проекта, определение ледовой нагрузки должно выполняться согласно нормативной методике на основе предпроектных

изысканий. Как ранее было показано, критическое состояние устойчивости таких сооружений возникает в результате возникновения колебаний сооружения (вибрации) и, даже – возникновения автоколебательного процесса – резонанса.

Согласно теории колебаний, **автоколебания** (термин введен А.А. Андроновым в 1928 г., [4]) – есть самовозбуждающиеся, самоустанавливающиеся колебания, самоподдерживающиеся за счет **подкачки энергии в системе объектов**, один из которых является осциллятором, а **источником энергии колебаний является сама система**. В рассматриваемом случае сама постановка исследуемой проблемы в качестве осциллятора предполагает МЛО, колебания которого генерируются за счет кинетической энергии ЛП, порционно передаваемой сооружению с помощью механизма ее дозирования, который также должен находиться внутри системы.

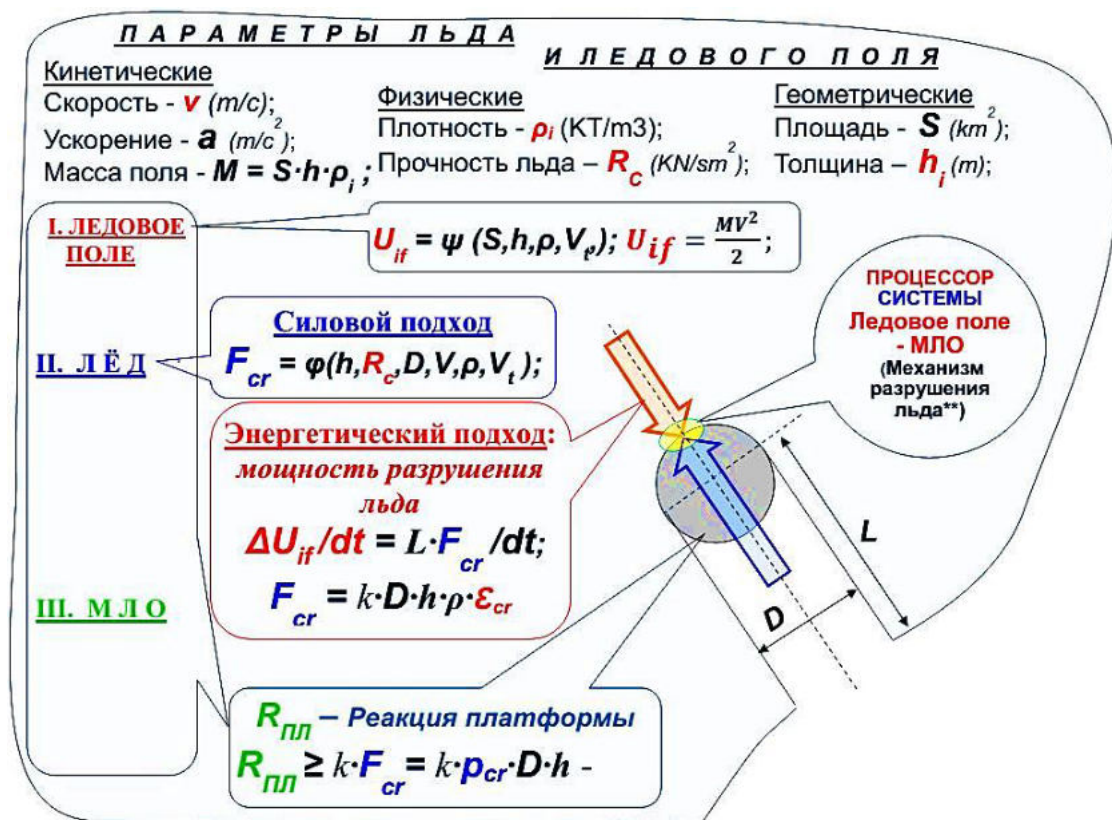


Рисунок 3.2.1 Схема силового взаимодействия объектов «ледовое поле» и «сооружение»

На рисунке 3.2.1 приведена схема, где помимо взаимодействующих ЛП и МЛО приведены обозначения их расчетных параметров и характеристик льда, необходимых для моделирования ледовой нагрузки на МЛО. Учитывая, что в процессе многочисленных экспериментальных исследований, показанных в предыдущих разделах, источником генерации циклической ледовой нагрузки на сооружение является *механизм разрушения льда*, первостепенное значение здесь имеет выбор параметра оценки **критерия его прочности**. Выбор этого параметра можно произвести по двум основным критериям [43]: по использованию предельных значений жесткостных и напряженно-деформационных

параметров льда (*группа силовых критериев*), или – по объему необходимой и достаточной для развития процессов деформирования и разрушения льда работы (*энергетические критерии*).

3.2.1 Силовой подход к моделированию взаимодействия ЛП с МЛО

На этапе дескриптивного моделирования логически оправданным является рассмотрение концептуальных основ существующих методологий определения ледовых нагрузок на сооружения *с целью применения их отдельных элементов при разработке новой методологии*. Рассмотрим действующие нормативные *модели определения ледовой нагрузки* с этих позиций. Сразу следует отметить, что методологии нормативных подходов к расчету ледовой нагрузки на сооружение [49,168,243] постулируют: контактная сила, вызывающая разрушение льда F_{cr} в рассматриваемом процессе *остаётся неизменной на всем его протяжении*. Очевидно, что это противоречит реальным процессам, в которых *контактная сила зависит от скорости взаимодействия и циклически изменяется во времени*.

Для исследования возможности описания процессов *квазидинамического* взаимодействия ледовых полей (ЛП) с опорами шельфовых сооружений рассмотрим *возможность* получения количественных параметров, описывающих динамический физико-механический процесс разрушения льда в рамках *силовой концепции*, являющаяся базой *существующих методологий* расчета ледовой нагрузки на МЛО.

Опубликованный впервые в 2010 году Международный стандарт ISO 19906 [230], основанный на статистических базах экспериментальных определений эффективных значений соотношений $P-A$ (давление – площадь), рекомендует определять ледовую нагрузку в виде произведения площади контактной поверхности опоры S и осредненного давления льда на контакте p_G , то есть здесь также *используется силовой подход*. Расчетная формула этого международного стандарта пространственно-напряженное состояние ледовой плиты и особенности механики разрушения льда учитывает в виде сочетания нескольких эмпирических коэффициентов. Этот *подход не предполагает учета кинетических и кинематических особенностей процесса динамического взаимодействия ледового поля с сооружением*.

Действующий российский нормативный документ по строительству СП 38.13330.2018 [104], так же как и отраслевые нормы [26], основаны на *концепции силового подхода* и рекомендуют определять расчетную ледовую нагрузку на опору

гидротехнического сооружения как наименьшую из двух: для случая остановки и для случая прорезания ледового поля опорой сооружения. В первом случае в расчете ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения документ рекомендует *учитывать скорость* движения ледового поля. Во втором случае рекомендуемая формула не обоснована аналитическим решением задачи – она имеет чисто эмпирическую основу.

3.2.1.1 Методология нормативного подхода к расчету ледовой нагрузки на сооружение

На рисунке 3.2.2 приведены графические интерпретации процесса взаимодействия ЛП с МЛО: разрушение льда при внедрении опоры в кромку ЛП (а) и при его прорезании опорой в установившемся режиме (б). Для установления количественных зависимостей между кинематическими и кинетическими параметрами процесса взаимодействия ледового поля и МЛО в качестве точки отсчета перемещения ледового поля относительно неподвижной жесткой опоры сооружения зададим точку «О» - как проекцию образующей опоры цилиндрической формы на горизонтальную плоскость.

Ось координат Ox направляем по направлению его движения ЛП, с началом координат на краю ЛП в момент времени $t = 0$, в который произойдет касание кромки поля с опорой. В принципе, возможны три сценария изменения параметров движения ЛП после начала контакта кромки ледяной плиты с жесткой поверхностью неподвижной опоры МЛО: остановку ЛП на стадии внедрения поверхности опоры в его кромку на глубину, не превышающую радиус опоры $x < r = d/2$; остановку поля при его частичном прорезании опорой при $x > r$; ледовое поле будет прорезано на всю его длину. Рассмотрим наиболее приемлемые из них для условий моря.

Ниже покажем, что для вычисления ледовой нагрузки на сооружение для показанных двух случаев формулы могут быть получены аналитическим путем из решения одного и того же дифференциального уравнения движения ледового поля в среде с сопротивлением.

Сценарий 1. Рассмотрим сценарий, когда ЛП *останавливается* в момент внедрения в него опоры на глубину его радиуса. Основными кинематическими параметрами, характеризующими его движение относительно точки начала отсчета $x = 0$ являются его начальная скорость $V(t, x)$ и его ускорение $a(t, x)$, которые будут изменять свои начальные значения от начальных V_0 и a_0 до нуля. Взаимосвязанность этих параметров записывается в виде двух дифференциальных уравнений первого порядка:

$$v(x, t) = dx/dt; \quad a(x, t) = dv/dt. \quad (3.2.1)$$

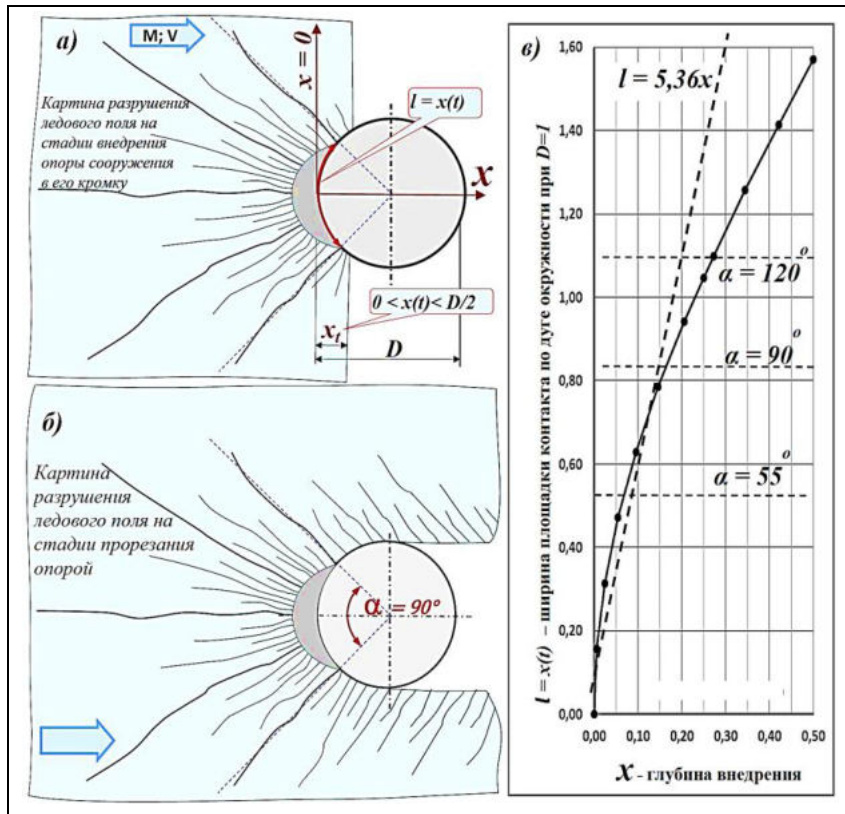


Рисунок 3.2.2. Параметры разрушения льда при внедрении опоры в кромку ЛП (а) и при его прорезании опорой в установившемся режиме (б): I - объем раздробленного и смятого льда – зона высоких напряжений сжатия; II - зона трещиноватости массива льда перед опорой; III – зона крупных блоков льда с трещинами; IV – зона главных радиальных «опережающих» трещин в массиве льда

контакта $S(x, t)$ на значение контактных разрушающих напряжений $p_k(v)$, уравнение (2) записываем в виде дифференциального уравнения второго порядка с учетом изменения всех величин с изменением координаты $x(t)$:

$$d^2x/dt^2 = S(x) \cdot p_k(x, v) / M. \quad (3.2.3)$$

Для решения задачи, считая основным расчетным случаем вариант непрерывного прорезания поля опорой, примем контактное давление, вызывающее разрушение льда на кромке ЛП постоянным $p_k = \text{const}$. Решение уравнения (3.2.3) получим, исходя из допущения линейности зависимости площади контакта S от координаты (x).

Площадь поверхности разрушения для случая внедрения определяется умножением толщины льда h на длину дуги l (Рисунок 3.2.2-а) в секторе «эффективного воздействия» опоры кругового очертания на ледовое поле, принимаемого в 90° по данным ряда исследователей (Табл. 3.2.1). Тогда длина дуги для $d = l$ выразится через глубину ее внедрения в лед (Рисунок 3.2.2-в), т.е. через координату $x(t)$ линейной зависимостью $l = 5,36 \cdot x(t)$. Погрешность допущения будет ощутимой лишь при значениях «эффективного

Решение системы (3.2.1) относительно скорости в виде $v = f(x, t)$ или ускорения $a = f_l(x, t)$ возможно только при введении начальной скорости движения ЛП $v = V_0$, и закона изменения сил сопротивления его движению $F(x, t, v)$, т.е. сил, вызывающих разрушение льда. Используя второй закон Ньютона для данного случая, запишем его в виде равенства изменения импульса ЛП сумме сил, действующих на него:

$$M \cdot (v_t - v_0) = F(x, v) \cdot dt \quad (3.2.2)$$

С учетом гипотезы о равенстве значения контактной силы $F(x, t, v)$ произведению площади

центрального угла» менее 55° и более 120° , что маловероятно в реальных условиях.

Таблица 3.2.1. Эффективное значение угла контакта ледового поля
с цилиндрической опорой

Таблица 3.2.1

α°	Исследователь, год, источник	Условия проведения испытаний
78°	И. Шварц, 1970 [335]	Свободное воздействие на натурную сваю
90°	Ю. В. Долгополов, 1971 [40]	Лабораторные опыты. Сваля предварительно заморожена
90°	Л. И. Забиланский, и др.	Продавливание модели сваи в натурном льду

Для получения решения уравнения (3.2.3) введем обозначение $b^2 = 5,36 \cdot h \cdot R_c / M$, с его учетом уравнение переписывается в виде:

$$d^2x / dt^2 - b^2x(t) = 0. \quad (3.2.4)$$

Из решения этого уравнения получаем описываемые гиперболическими функциями зависимость глубину внедрения опоры в плоскость ЛП $x(t)$ и снижение его начальной скорости v_0 в процессе внедрения опоры на значение этой глубины:

$$x(t) = v_0 / b \cdot \sinh(bt), \quad V(t) = x'(t) = v_0 \cdot \cosh(bt) / \sinh^2(bt). \quad (3.2.5)$$

Это дает возможность проанализировать изменения таких кинематических и кинетических параметров движения поля как: глубина внедрения опоры в плоскость ЛП $x(t)$; скорость движения поля $V(t)$; ледовая нагрузка на опору $F(x, t)$, которая определяется из уравнения (3.2.4), если его вновь записать в кинетической форме, т.е. рассмотреть равенство сил воздействия ЛП и сопротивления льда. Тогда уравнение (3.2.4) записывается с учетом полученного решения дифференциального уравнения следующим образом:

$$F(x, t, v) = b^2 \cdot x(t) \cdot M = b^2 \cdot v_0 / b \cdot \sinh(bt) \cdot M = b \cdot M \cdot v_0 \cdot \sinh(bt). \quad (3.2.6)$$

После подстановки всех известных величин, замены массы ЛП на произведение его площади A (m^2), толщины h (м) и плотности льда ρ (~ 920 кг/ m^3), получим формулу для определения нагрузки на опору сооружения для стадии её внедрения в кромку ЛП при $x < d/2$, а также для стадии прорезания ЛП опорой сооружения ($x \geq d/2$) в виде (3.2.7 и 3.2.8), аналогичном виду формул (50) и (51), рекомендуемым СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (Волновые, ледовые и от судов)» [243] для «широкой» опоры ($d/h \geq 50$):

$$F(x, t) = 0,07V_0h\sqrt{ApR_c} \cdot Sh(bt); \quad (3.2.7)$$

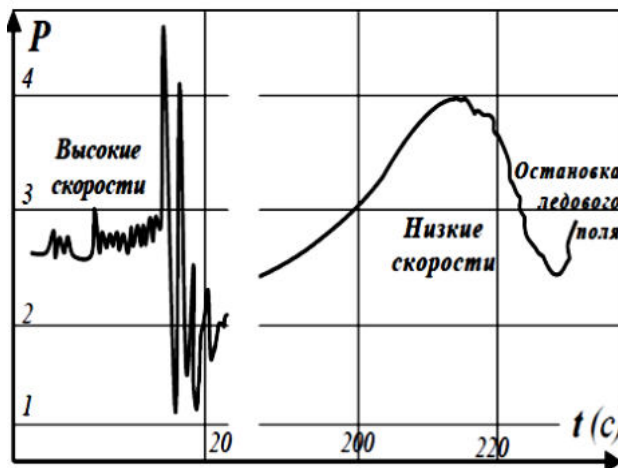


Рисунок 3.2.3 Зависимость силы давления льда на опору от скорости ледовых полей по Peyton H.R. [96]

Подстановка вещественных значений всех параметров, участвующих в описании процесса остановки ЛП может дать значение времени его протекания. Но этот отрезок времени *не есть время одного цикла* взаимодействия МЛО с ЛП, когда оно имеет большой запас инерции движения (кинетической энергии). Графическая интерпретация процесса взаимодействия ЛП с МЛО для условий данного сценария имеет вид, изображенный в правой части рисунка 3.2.3, взятого для пояснения разницы явлений из работы G.R. Peyton [96], исследовавшего эти процессы на экспериментальном основании буровой платформы в заливе Кука на Аляске: в момент максимальной глубины внедрения $x=D/2$ контактная сила максимальна, а скорость ЛП $V(t)=0$.

Сценарий 2. Ледовое поле обладает очень большим объемом кинетической энергии, который при его прорезании опорой сооружения сколь-нибудь значительно не уменьшится, например может уменьшиться в пределах до 10%. То есть *скорость ЛП остается практически постоянной* на всем протяжении процесса взаимодействия. В данном случае будет иметь место

$$F_{c,w} = 0,07 \cdot V h_d \sqrt{A \rho R_c}. \quad (3.2.8)$$

Графическая интерпретация процесса взаимодействия ЛП с МЛО для условий данного сценария будет иметь вид, изображенный в левой части рисунка 3.2.3.

Таким образом, полученные решение задачи в «классической» постановке решения уравнения Ньютона для движения тел в среде с сопротивлением при неизменной массе и известной начальной скорости демонстрируют решения, аналогичные решениям, регламентируемым СП 38.13330.2018 [104].

Очевидно, что использование концепции силового подхода к решению рассматриваемой задачи в такой постановке *не может дать корректного ее решения* относительно силы сопротивления среды. В данном случае формулой (3.2.8) устанавливается только относительно *постоянное среднее значение «искомой» силы сопротивления льда* после того, как она достигнет максимума при глубине внедрения $x \geq d/2$, это возможное решение для ледовых полей больших размеров, которые не остановятся в принципе, поскольку их масса колоссальна. Хорошо известное в настоящее время явление «пилообразной» циклической нагрузки на МЛО в реальных условиях эксплуатации полученными формулами показать не представляется возможным. Но,

главное – этот *силовой подход* уже в своей постановке *не позволяет получать* второй главный параметр циклической ледовой нагрузки – *частоту ее пиковых значений*.

3.2.1.2 Концептуальная модель силового описания генерации циклической нагрузки от ЛП на МЛО

Феноменологическая модель, рассмотренная в этом разделе, является временным, «транзитным» решением в ряду задач по проблеме определения ледовых нагрузок от ЛП на МЛО. Она содержит описание только основных элементов явления контактного взаимодействия вертикальной опоры МЛО с торцевой гранью ЛП, как сложного комплексного процесса механизма разрушения ледовой плиты и льда в толще ее массива. Этот механизм сформирован по результатам многих экспериментальных исследований, анализ которых выполнен во второй главе, а также с использованием отдельных известных теоретических решений, которыми можно описать лишь отдельные фрагменты рассматриваемого явления. В то же время результаты рассмотрения данной феноменологической модели дают основания для поиска «истинного механизма разрушения льда» и разработки феноменологического критерия прочности льда как квазихрупкого материала, а также математических моделей разрушения массива льда в ледовой плите, что должно стать базой как для метода экспериментального определения критерия разрушения льда, так и для составления имитационной модели расчета ледовой нагрузки на МЛО. Важной частью исследования феноменологических аспектов рассматриваемого явления является также оценка влияния каждого из основных параметров процесса взаимодействия ледового поля и морского ледостойкого основания в системе «ЛП-МЛО», рассмотренной в предыдущих разделах этой главы, таких как, масса M и скорость V ледового поля, размер D и жесткость опоры сооружения, прочностные и другие параметры льда $\sigma_{сж}$, σ_p , ρ .

Анализ записей реальной нагрузки от движущихся полей льда на опоры гидротехнических сооружений [163,173,171,180,322,336,335, 59,79] показывает, что она носит ярко выраженный циклический характер (Рисунок 3.2.3). При этом скорость движения поля оказывает большое влияние не только на периодичность появления максимальных нагрузок, но и на их величину. Кроме того, в процессе взаимодействия явлению внедрения опоры в ледовый покров предшествует другое явление – образование сети трещин как в плане, так и в толще ледового покрова (Рисунок 3.2.4). Численное значение нагрузки, что следует из феноменологических особенностей макромеханики разрушения торцевой грани ЛП, как конструкции и микромеханики разрушения

морского льда, как материала, что показано в исследованиях многих авторов [170,222,223,255,302,373,381, 19,117,132], в сильной степени *зависит от суммарной площади трещин* в зоне ее контакта с льдиной.

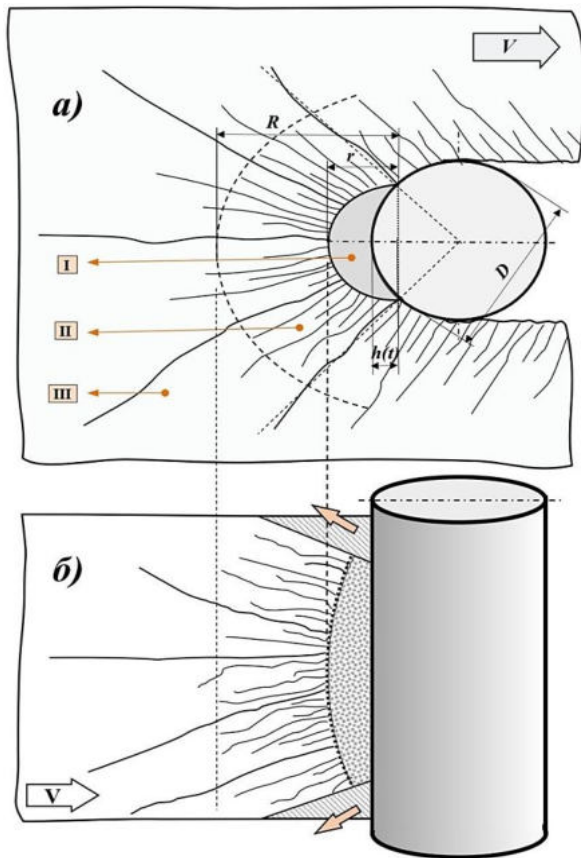


Рисунок 3.2.4 Характер разрушений на этапе прорезания ЛП опорой ледостойкого сооружения в установившемся режиме: I – зона полного смятия обломков льда – зона сильного всестороннего сжатия; II – площадь до разрушения зоны полного растрескивания льда массива перед опорой сооружения; III – зона распространения основных «опережающих» радиальных трещин

в результате действия растягивающих напряжений, распределенных в зоне контакта. Однако только развитие этих трещин не приводит к контактному разрушению льда и продвижению – прорезанию ледовой плиты опорой сооружения. Опыт проектирования и эксплуатации сооружений показывает, что лед должен быть разрушен по одному из рассмотренных в предыдущем разделе вариантов: сколами, дроблением, смятием и т.д. [132,125,134]. Но трещины, распространяясь в ледовом поле, как в конструкции, создают условия для разрушения льда при одноосном его нагружении, образуя слои (зоны) предразрушения [132,223, 133]. Чем глубже будет эта зона и чем больше в ней будет развиваться трещин, тем меньше будет

При этом увеличение количества трещин не только уменьшает расчетную толщину «целика» льда перед опорой. Последнее, как известно [173,135,63,66], зависит от формы опоры и уплотненной зоны льда перед ней (Рисунок 3.2.4).и обуславливает характер его напряженного состояния перед опорой. Для расчетного случая, как *следует из системно-методологического анализа явления взаимодействия ЛП с МЛЮ*, когда размеры ЛП велики, *затрачиваемая на разрушение льда энергия ЛП*, определяющая значение ледовой нагрузки, не зависит от массы этого поля. Но его скорость V , так же, как и прочность льда σ определяют *удельную величину сопротивления льда разрушению*, а толщина льда h и размер опоры D - площадь контакта. Следовательно, метод расчета ледовой нагрузки, должен учитывать взаимодействие всех этих факторов и упорядочить *размеры пропорций вклада* каждого из факторов в *численное значение силы воздействия* на контактную поверхность опоры.

Трещины, распространяющиеся от кромки льдины на ее глубину, возникают

интегральное значение нагрузки на опору (Рисунок 3.2.4).

Если учитывать, что в плите льда при ее взаимодействии с опорой, одновременно *формируются* новые и *развиваются старые трещины*, и при этом *лед разрушается* с нарушением его структуры в зоне контакта (Рисунок 3.3.4), то уравнение движения льдины для рассматриваемого случая записывается в виде:

$$M \frac{dv}{dt} = (\sigma_c \cdot F_c + \sigma_{cr} \cdot \Delta F_{cr}), \quad (3.2.9)$$

где M , v - масса и скорость льдины; σ_c и σ_t - пределы прочности льда при смятии и растяжении; F_c , ΔF_{cr} — площадь сминающегося льда и площадь одновременного удлинения трещин в зоне предразрушения соответственно.

Для грубой оценки зависимости величины нагрузки на опору от скорости движения льдины толщиной h определим площади F_c и ΔF_{cr} (Рисунок 3.2.4):

$$F_c = \pi r H; \quad \Delta F_{cr} = \xi \pi R H, \quad (3.2.10)$$

где ξ - функция, определяющая зависимость величины приращения площади трещин с удалением от площадки нагружения.

Скорость изменения кинетической энергии льдины должна быть равна мощности разрушения льда:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} \left(\frac{Mv^2}{2} \right) &= \frac{d}{dt} (\sigma_c \cdot F_c \cdot r + \sigma_{cr} \cdot \Delta F_{cr} \cdot \Delta R), \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{Mv^2}{2} \right) &= \frac{d}{dt} (-\sigma_c F_c r - \sigma_p \Delta F_t \Delta R), \quad \text{или} \\ vM \frac{dv}{dt} &= -2\sigma_{сж} H \cdot 5,36h \frac{dh}{dt} - 2\sigma_p \pi \xi R H \frac{dR}{dt}. \\ vM \frac{dv}{dt} &= 2\sigma_c \pi r H \frac{dv}{dt} - 2\sigma_p \pi \xi R H \frac{dR}{dt}. \end{aligned} \quad (3.2.11)$$

Приравняв $M \cdot dv/dt = P$ и обозначив $v = dh/dt$, можно получить выражение для нагрузки на опору, считая $r \approx \sqrt{Dh_0}$:

$$P = -H \left(\sigma_c D + 2\sigma_p \xi R \frac{dR}{dy} \frac{1}{v} \right). \quad (3.2.12)$$

Как и должно быть, *масса льдины не оказывает влияния на значение контактной силы*, а второй член правой части этого уравнения *определяет влияние скорости движения льдины на величину нагрузки на опору*. Известно, что предел прочности льда на сжатие на порядок превышает предел прочности его на растяжение, поэтому второй член в правой части уравнения (3.2.12) дает значительное приращение силы внедрения опоры в лед *только в случае очень низких скоростей движения льдины*. Для относительно высоких скоростей движения льдин этот член можно опустить. Таким образом, уравнение (3.2.12) *позволяет оценить влияние скорости движения льдины на величину и характер изменения нагрузки на опору*.

При квазистатическом внедрении опоры в ледяной покров (индекс I), когда значение v мало, изменение глубины зоны трещин имеет вид ломаной линии (Рисунок 3.2.5-б, $h_{01}(t)$,

$R_1(t)$), каждый скачок которой соответствует очередному этапу приращения длины трещин после достижения в массиве льда напряжений σ_p . Рост напряжений до значений σ_p происходит за время Δt_{i1} , необходимое для формирования напряженного состояния массива льда перед опорой. Интервал Δt_{i1} определится значением σ_p и скоростью роста нагрузки P : $\Delta t_{i1} = \sigma_p / P$. При малых скоростях нагружения зависимость силы сопротивления во времени - пилообразная линия (Рисунок 3.2.5-б, $P_{ст.}(t)$), каждый пик которой соответствует нагружению очередного слоя льда до критического состояния.

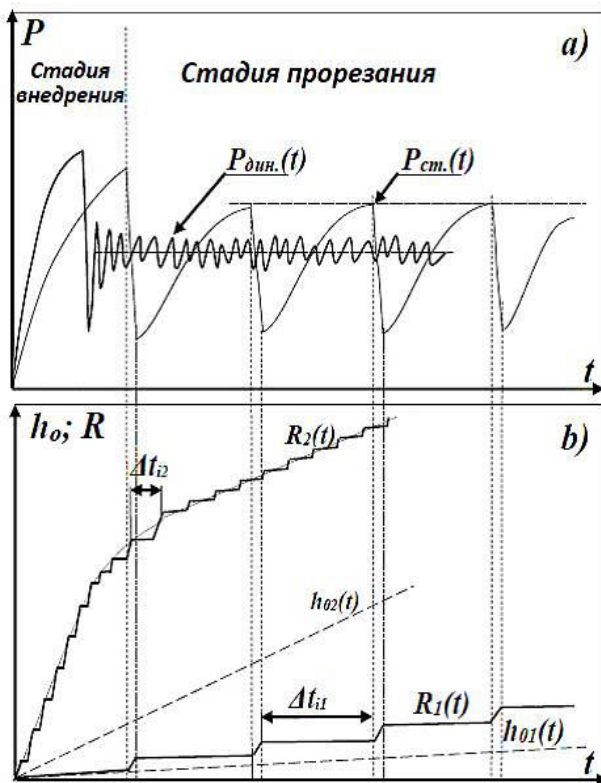


Рисунок 3.2.5 Характеристики процесса разрушения льда при статическом (R_1) и динамическом внедрении (R_2)

После его разрушения значение силы сопротивления резко снижается до ее значений, близких к нулю (вследствие перемещения - раздвижки частиц и блоков разрушенного льда перед опорой). То есть, практически вся энергия упругих деформаций неразрушенного льда, накопленная в нем при нагружении очередного слоя до критического напряженного состояния, при разрушении слоя рассеивается и нагружение массива льда начинается снова практически от нуля. С увеличением скорости движения льдины, наблюдается *динамическое внедрение опоры в лед* (индекс 2), характеризующееся уменьшением скачков силы сопротивления $P_{дин.}(t)$, и на определенном этапе их уже можно не учитывать и заменить осредненными значениями. При дальнейшем увеличении скорости движения ледовых полей зависи-

мость силы сопротивления $P_{дин.}(t)$ от времени становится сравнительно плавной, без резких и значительных скачков (Рисунок 3.2.5 - а), обусловленных разрушением отдельных слоев льда. Это связано с тем, что его разрушенные частицы за время Δt_{i2} (Рисунок 3.2.5- б) не успевают раздвинуться на такие расстояния, при которых могло бы происходить рассеивание потенциальной энергии упругой деформации неразрушенного льда в массиве. Здесь имеет место практически постоянный контакт опоры со льдом через его разрушенные частицы, т. е., передача энергии при внедрении происходит непрерывно, а разрушение льда – скачкообразно.

Следовательно, при больших скоростях движения полей разрушение будут происходить сначала дроблением, потом только - смятием. Анализ результатов проведенного качественного исследования дает возможность все случаи

взаимодействия льда с цилиндрическими вертикальными опорами описать, используя сочетания факторов, приведенных в таблице.

Таблица 3.2.2 Сочетания уровней факторов, определяющих тип (механизм) разрушения льда

ФАКТОРЫ	Условные уровни факторов	
1	2	3
Прочность льда	Прочный	Слабый
Толщина льда	Большая	Малая
Скорость поля	Не высокая	Высокая
Ширина опоры	Широкая	Узкая
Размеры ледовых полей	Малые поля	Большие поля

Изменение уровней факторов в любом из их сочетаний вызывает изменение характера взаимодействия опоры со льдом. Например, сочетание факторов, условные уровни которых приведены в графе 2, определит возможную остановку льдины у сооружения. Но сочетание этих же факторов с их условными уровнями, приведенными в графе 3, определит прорезание опорой ледяного поля. Сопротивление льда на кромке ледового поля при внедрении в него опоры может изменяться в широких пределах, в зависимости от его температуры и солёности, а также от скорости ледового поля. Это говорит об очень широком диапазоне проявления возможных механизмов разрушения льда, их параметры, наверное, невозможно описать какой-либо силовой моделью, поэтому необходимо рассматривать энергетический подход к решению данной задачи.

3.2.2 Энергетический подход к моделированию взаимодействия ЛП с МЛО

Основные параметры процесса взаимодействия элементов системы ЛП – МЛО показаны на схеме на Рисунок 3.2.1. Количественной характеристикой кинетического процесса обмена энергией между ледовым полем и МЛО является объем энергии ледового поля ΔU_L , затрачиваемой им на разрушение объема (массы) льда W_{cr} по длине прорези L в ледовом поле. Следуя законам механики, для вычисления эффективного значения удельной энергии разрушения единицы объема льда в ненарушенном состоянии ε_{cr} в течение некоторого промежутка времен взаимодействия ЛП с МЛО формулу определения удельной энергии можно записать в виде (Рисунок 3.2.1):

$$\varepsilon_{cr} = \Delta U_{ЛП} / (W_{cr} \cdot \rho) = \Delta U_{ЛП} / (D \cdot L \cdot h \cdot \rho) \quad (3.2.13)$$

Кинетическое описание процесса затрат энергии ледового поля на разрушение льда в зоне его контакта с поверхностью опоры МЛО, должно основываться на **законе сохранения энергии**, т.е. на равенстве *скорости изменения энергии* ЛП ($\Delta U_{\text{ЛП}}$) в процессе его контактного взаимодействия с поверхностью опоры сооружения и *мощности затрачиваемой на разрушение льда энергии*, эквивалентной *работе этой силы*, затраченной на прорезание ЛП на глубину прорезания ледовой плиты ΔL . С учетом обозначений на схеме взаимодействия ЛП с МЛО (Рисунок 3.2.1) условие (3.2.13) запишется в виде:

$$\Delta U_{\text{ЛП}}/dt = (\overline{F_{cr}}(t) \cdot L(t))/dt, \quad (3.2.14)$$

$$\overline{F_{cr}} = k \cdot D \cdot h \cdot \rho \cdot \varepsilon_{cr} \quad (3.2.15)$$

Здесь работа вычисляется по среднему значению контактной силы $\overline{F_{cr}}$, определяемой по кривой плотности нормального распределения, которую строят по записи цифрового ряда наблюдаемых в реальном или модельном процессе текущих значений этой силы (Рисунок 3.2.6). Численное значение этой работы, может быть различным и зависит от энергетической прочности льда – ε_{cr} , распределенной *неравномерно по его площади и толщине*, поэтому требуемой определения вероятности ее максимальных значений по данным полевых экспериментальных исследований. Весь имеющийся объем кинетической энергии поля $U_{\text{ЛП}}$, как видно из (3.2.2), не влияет на процесс, поскольку здесь априори считается, что затраты части этой энергии по отношению к ее исходному значению пренебрежимо малы. В противном. Случай с небольшими размерами ледовых полей, также как и имеющих низкую скорость – не расчетные. Но значение скорости движения ледового поля, что хорошо изучено [163,322,61,61], оказывает влияние на параметры прочности льда. Следовательно, *кинетические закономерности движения ледового поля тесно связаны с изменениями объема его кинетической энергии, затрачиваемой на разрушение льда*.

3.2.2.1 Дескриптивное определение концептуальной энергетической модели генерации циклической нагрузки от ЛП на МЛО

Тождество (3.2.13) имеет концептуальное значение, поскольку оно описывает удельную энергию разрушения льда, имеющего присущие ему физико-механические параметры в широком диапазоне его состояний от «теплого и мягкого» льда до «очень прочного – жесткого» льда. Кроме того, оно будет соблюдаться в течение всей длительности процесса взаимодействия как при «плавном» прорезании ледового покрова с непрочным льдом, так и в каждом его цикле нагрузки-разрушения, если лед обладает относительно высокой удельной энергией, которую необходимо затратить на разрушение его локально

объема-слоя в напряженном объеме в зоне контакта ЛП с МЛО (Рисунок 3.2.6). Именно такой случай рассматривается в данном исследовании. Исходя из этого, можно полагать, что в тождествах (3.2.13) и (3.2.14) в обобщенном виде содержится запись реального динамического процесса разрушения льда, характеризуемого **параметрами его циклов (cikls)**: как значениями максимальных контактной силы F_{max} , так и периодов повторения таких циклов f_{cicl} , что является **главной задачей**, решение которой должно привести к **решению рассматриваемой в диссертации проблемы**.

На рисунке 3.2.6 представлен феноменологическая модель **циклического**, или, что тождественно, **послойного** разрушения ледового покрова внедряющейся в него цилиндрической опорой. Глубина прорезания λ_i за один цикл нагрузки – сброса, то есть толщина разрушенного слоя завит не только от энергоемкости разрушения льда ($\mathcal{E}_{cr}$), находящегося

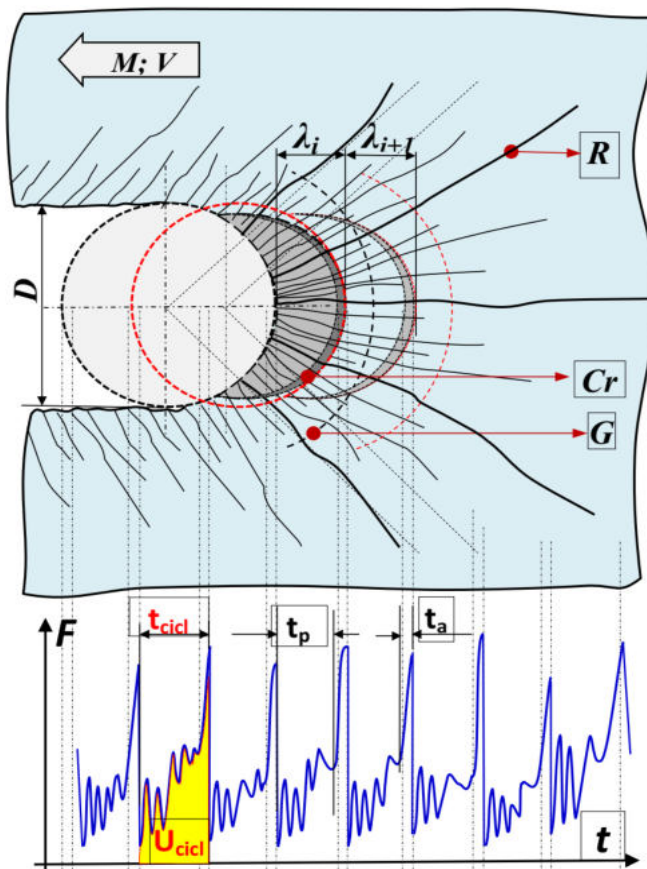


Рисунок 3.2.6 Графическое представление концептуальной модели послойного разрушения льда на опоре МЛО

интегральным показателем на все одновременно происходящие в массиве льда процессы разрушения, то есть **параметр $\mathcal{E}_{cr}$, является эффективной характеристикой процесса разрушения** массива льда в зоне контакта ЛП с МЛО.

в определенном и конкретном его физическом состоянии, но и от геометрических и кинематических соотношений задачи, показанных на Рисунок 3.3.1.

Важной особенностью рассматриваемого явления разрушения льда в массиве кромки ледового поля является его комплексность: процесс смятия сильно растрескавшегося массива с выжиманием продуктов смятия и осколков льда непосредственно на поверхности опоры (Cr), является «заключительным» в ряду других, протекающих последовательно–параллельно с ним: развитие магистральных трещин (R) и появление кольцевых, расщепляющих плиту льда трещин (G). Поэтому **нельзя удельные затраты энергии относить только на один из видов (механизмов) разрушения льда**, в данной задаче они являются ин-

3.2.2.2 Концептуальная модель энергетического описания генерации циклической нагрузки от ЛП на МЛО

Для решения задачи определения параметров цикла нагрузки локального объема льда и ее сброса в результате его разрушения составим математическую модель механизма разрушения льда на контакте перед поверхностью внедряющегося в толстую плиту из упруго-хрупкого материала жесткой цилиндрической опоры МГТС, основанную на представленной соотношениями (3.2.13) – (3.2.15) энергетической концепции описания процесса взаимодействия ЛП с МЛО. Целью разрабатываемой модели является выявление и математическое описание критерия прерывания роста контактной силы, как «ключевого элемента» в механизме периодического разрушения льда в процессе взаимодействия ЛП с МЛО (Рисунок 3.2.6).

Математическое описание исследуемого явления для получения количественных характеристик затрат энергии на разрушение льда выполнено по аналогии с описанием процессов динамического внедрения жесткой сферы в полупространство из хрупкого материала [142] и порядком развития разрушений в полупространстве мало-пластичного материала при статическом вдавливании в его поверхность плоского штампа [54] и ряда других моделей.

Представленное ниже решение получено при нескольких стандартных для таких задач допущениях, базирующихся на принятой энергетической концепции циклического разрушения кромки ЛП на фронте разрушения льда перед внедряющейся в него жесткой поверхностью неподвижной преграды на глубину слоя (λ). При этом *монолит льда*, имеющий отдельные радиальные (R) и горизонтальные кольцевые трещины (G), *считается не разрушенным*, если он выдерживает сжимающую нагрузку на контакте с поверхностью опоры или с поверхностью спрессованных продуктов разрушения льда перед ней (Cr), *препятствуя продвижению ЛП*. Всесторонне сжатый элементарный объем массива и отдельных блоков льда, имеющего естественную структуру, внутри очередного слоя разрушения λ_i может находиться только в двух состояниях: не разрушенном – *состояние 0* (λ^0) и раздробленном – *состояние F* (λ^F).

Лед, находящийся в *состоянии 0 остаётся упругим* при его постепенном нагружении вплоть *до момента его хрупкого разрушения* (раздробления) и его деформации на этом участке деформирования отвечают условиям неразрывности (совместности) во всех направлениях. Переход льда в напряженном слое λ_i из *состояния 0 в состояние F* на каждом цикле внедрения опоры *происходит* в конце активного этапа (t_a) цикла внедрения *скачком перемещения некоторой поверхности разрушения (фронт разрушения)* в физическом пространстве на глубину слоя λ_i в виде спонтанного развития сети трещин, порождающих массу *первичных продуктов разрушения* (обломки блоков и кристаллов льда).

В конце активного этапа каждого цикла внедрения опоры в лед начинается 2-й этап

цикла внедрения – t_p , пассивный, этап выдавливания блоков и осколков льда из зоны контакта. В условиях всестороннего сжатия некоторая их часть превращаются в мелкодисперсную среду – ледяную крошку и спрессовывается в жесткую прокладку из расплавившихся и смерзшихся обломков кристаллов. С этого момента начинается следующий цикл взаимодействия ЛП с МЛО. Определение *времени одного полного цикла* t_{cicl} контактного взаимодействия, состоящего из двух этапов ($t_{cicl} = t_a + t_p$) является **второй задачей** исследования механизма разрушения льда на опоре сооружения.

Момент хрупкого разрушения очередного слоя льда феноменологически понимается в этой задаче как некоторый мгновенный *разрыв напряжений и деформаций* не на условной, а на *физически реальной поверхности в массиве льда*, которая отделяет не разрушенный лёд (λ^0) от раздробленного (λ^F) в каждом слое. Учитывая, что все происходящие здесь сложные физические процессы являются лишь формой преобразования энергии ЛП в энергию продуктов разрушения льда и их перемещения и уплотнение, явление разрушения льда на фронте разрушения рассматривается с позиций законов сохранения, в каждой точке фронта по Г.П. Черепанову должны выполняться: уравнение сохранения массы; три скалярных уравнения сохранения импульса, а также уравнение сохранения энергии. Для локальной системы декартовых координат x_1, x_2, n , (где n – внешняя нормаль к поверхности фронта в точке разрушения) эти уравнения записываются так:

$$\rho_0(V_n - v_{n0}) = \rho_F(V_n - v_{nF}) \quad (3.2.16)$$

$$\sigma_{n0} - \sigma_{nF} = \rho_0(v_{n0} - V_n)(v_{n0} - v_{nF}) \quad (3.2.17)$$

$$\tau_{i0} - \tau_{iF} = \rho_0(v_{n0} - V_n)(v_{i0} - v_{iF}); \quad (i = 1; 2) \quad (3.2.18)$$

Уравнение сохранения энергии для рассматриваемого случая можно записать как уравнение общего энергетического баланса для элементарного объёма льда, подверженного деформированию:

$$\frac{\sigma_{nF}}{\rho_F} - \frac{\sigma_{n0}}{\rho_0} = \frac{1}{2} \cdot (V_n - v_{n0})^2 + U_0 - \frac{1}{2} \cdot (V_n - v_{nF})^2 - U_F + \varepsilon_{cr} \quad (3.2.19)$$

В уравнениях (3.2.16) – (3.2.19) ρ и v – плотность и скорость материальных частиц льда в сжимаемом объёме соответственно; σ_n – напряжение на поверхности нагружения, действующее по нормали к этой поверхности; V_n – скорость распространения поверхности разрушения по направлению нормали; U – упругий потенциал единицы массы льда; ε_{cr} – диссипация энергии на поверхности разрушения, приходящаяся *на единицу массы льда* (поверхностная энергия трещин, энергия остаточных микронапряжений и др.).

Левая часть уравнения (3.2.19) представляет собой изменение энергии деформации льда при переходе его от состояния 0 к состоянию F . Правая часть уравнения представлена членами, показывающими изменение упругого потенциала единицы массы льда, его кинетической энергии и диссипации энергии в единице массы льда при его переходе от состояния 0 к состоянию F . Исключая из (3.4) скорости V_n и v_n при помощи (3.2.16) и

(3.2.17), нетрудно получить соотношение

$$\varepsilon_{cr} = U_0 + U_F - \frac{1}{2}(\sigma_{nF} - \sigma_{n0}) \cdot \left(\frac{1}{\rho_F} - \frac{1}{\rho_0}\right). \quad (3.2.20)$$

Учитывая, что скорость взаимодействия движущегося ледяного поля и сооружения не большая и значение плотности льда не может измениться в процессе взаимодействия больше чем на 5-7 % (от 0,926 до 1,0), уравнение сохранения энергии в этом случае примет вид

$$\varepsilon_{cr} = U_0 + U_F, \quad (3.2.21)$$

т.е. упругий потенциал претерпевает скачок на поверхности разрушения.

Это условие (3.6), по аналогии с критерием Гриффитса, для однородной непрерывной среды формулируется Черепановым Г.П. [142], Федоровым В.В. [109] и Екобори Т. как термодинамический критерий разрушения материала, и в приложении к рассматриваемой нами проблемы этот критерий формулируется так: **минимально необходимое количество упругой энергии, высвобождающейся вследствие хрупкого разрушения единицы массы льда, есть постоянная величина для этого материала.**

3.3 Синтез концептуальной базовой модели для описания циклического разрушения льда на контакте с преградами

С точки зрения методики и организации проектирования МЛО, для *практики необходима* адаптированная к современному уровню вычислительных методов и, в то же время, адекватная всем возможным сценариям развития процесса взаимодействия ЛП–МЛО, понятная на инженерном уровне **теоретическая модель – алгоритм расчета ледовой нагрузки**. Поэтому двумя важнейшими условиями в обеспечении надежности метода расчета ледовой нагрузки на морские сооружения являются **выбор модели разрушения** (механизма, гипотезы) льда, адекватной реальному процессу и **соответствующего этой модели критерия разрушения** этого уникального природного материала.

Здесь следует отметить, что, ввиду высокой актуальности проблемы, вопросам взаимодействия инженерных сооружений со льдом (и не только в области строительства стационарных морских оснований) посвящено большое количество исследований, ниже нами выполнен обзор и анализ лишь **основных моделей динамического разрушения льда при местном смятии**, используемых в современной отечественной и мировой практике шельфового строительства и судостроения. Безусловно, чтобы получить наиболее адекватную реальному процессу взаимодействия инженерных конструкций со льдом **модель ледовой нагрузки** для формирования математического аппарата для расчета ее численных значений, необходимо сделать максимально адекватное *описание самой ледовой среды*. Это обусловило направление развития описаний истинной природы деформации и разрушения

морского льда как *континуума* с учетом присущих этому материалу особенностей. Поэтому здесь рассматриваются *континуальные модели*, в которых морской лед представлен в виде сплошной среды и анализ основан на феноменологических представлениях о *процессах переноса*. Основной чертой всех этих моделей является то, что поведение льда в них рассматривается как твердого тела с неизменным фазовым состоянием, но с изменяющейся реологией, зависящей от его температуры и условий нагружения.

В качестве наиболее неблагоприятного из *возможных режимов взаимодействия* ЛП–МЛО только в некоторых известных теоретических моделях *режим циклического разрушения льда, вызывающий возникновение установившихся автоколебаний МЛО*, рассматривается на основании результатов экспериментальных наблюдений или физических экспериментов. Чаще предлагаются численные модели, реализующие сценарии достижения предельного напряженно-деформированного состояния по первой, второй или третьей теории прочности и использующие в качестве основного критерия прочности, идентифицируя его с критерием разрушения все тот же предел «одноосной прочности льда».

Не останавливаясь здесь на анализе вероятности появления условий для формирования такого режима в реальной действительности (см. разделы 1.3...), отметим большое разнообразие концепций моделей, предлагаемых их авторами для описания процесса динамического взаимодействия элементов системы ЛП–МЛО. Известны модели взаимодействия ледовых полей с сооружениями как при медленных подвижках, так и при динамических: модели непрерывного дробления [339,67] и модели послойного разрушения льда [241,248,123,126]; динамические упруго–хрупкие модели, основанные на законе Гука [226,293,295,321]; модели скалываемых клиньев [11,171,175,265,271,342,357, 362]; вероятностные механические модели [357]; модели периодического дробления со сколами [175,184,340,370,383]; модели с “отрицательным демпфированием” [163,181,244,279, 71]; модели с самостоятельным элементом – механизмом разрушения льда [241, ,221,248,266, 339,370,52,99]; деформационные модели, например модель относительного смещения (модель сухого трения [21]); модели с переменной площадью контакта [28]; стохастическая [11] и спектральная [249] модели; а также модели, использующие метод вихрь–индуцированной вибрации (ВИВ) и уравнение Ван Дер Поля [235]; импульсная модель [147] и другие виды моделей.

Следует отметить, что большая часть рассмотренных моделей – это *не полные функциональные модели*, в которых *процесс разрушения льда*, как феноменологического материала и материальной основы модели *не рассматривается*, моделируется только процесс взаимодействия ЛП с МЛО. Часть предлагавшихся моделей авторами экспериментально не верифицировалась, а решения по другим моделям сопоставлялись только с численными решениями по МКЭ, т.е. они имеют имитационный статус, *как правило – с*

учетом физико-механических параметров льда, но без привязки к физическим процессам разрушения льда.

Развитие моделей по теме исследования, рассмотренных с применением МКЭ, выполнено в работах [179,220,238,252,290,107, и др.], в том числе с исследованиями механизмов разрушения льда с применением физико-механических параметров льда – в работах [211,238,252,290,331,107 и др.]. Особенности разработанных моделей рассмотрены во Введениях показанных выше статей и в специализированных обзорах, в т.ч. и диссертаций: [177,306,68,107].

Для относительно полного представления достигнутого уровня исследований в этой области *достаточно исследовать три класса теоретических моделей*, предлагавшихся разными авторами для использования в качестве алгоритмов расчета ледовой нагрузки: *модели непрерывного разрушения льда; модели непрерывного контактного дробления льда в зонах высокого давления; модели циклического скалывания блоков льда торцевой грани ледового поля.*

Учитывая, что каждая из этих трех моделей описывает лишь упрощенный вариант сложнейшего явления комплексного механизма разрушения льда, ни одна из них ввиду ограниченности используемых конститутивных соотношений не описывает этот механизм адекватно всем его проявлениям в полной мере. В тоже время, эти три типа моделей в совокупности их исходных предпосылок, в принципе, представляют главные свойства реального процесса разрушения льда, происходящего в контактной зоне ЛП с МЛО: *непрерывность явления разрушения льда, неравномерность распределения контактных давлений по номинальной площади контакта и разномасштабность и неодновременность актов сколов* как «внутри» общей контактной площади, так и на ее периферии.

Парадокс ситуации состоит в том, что при определенных начальных условиях реализации процесса контактного взаимодействия льда с преградой, его разрушение может быть описано одной из этих трех моделей. Так, при внедрении индентора в слабый лед, его массив под давлением внедряющейся в него твердой поверхности будет распадаться на кристаллы, они будут сминаться и крошка будет выдавливаться на периферию контакта. Очень холодный лед будет растрескиваться уже при небольшой нагрузке, трещины будут распространяться преимущественно к свободным поверхностям – будут наблюдаться сколы разного масштаба. В массиве морского льда при средних температурах» ($-8,5^{\circ} \div -23,0^{\circ}$) будут протекать все виды процессов разрушения структуры льда одновременно

3.3.1 Гипотеза непрерывного разрушения льда

Модели «непрерывного дробления», составляющие самостоятельную группу моделей взаимодействия, разрабатываются на протяжении достаточно длительного периода. Первой моделью разрушения льда на контакте с ледовым полем можно считать «классическую» запись формулы предельного состояния льда в рамках концепции сопротивления материалов разрушению, принятую еще в конце 19 века, и постоянно использовавшуюся с периодическими корректировками на основании огромного числа экспериментальных работ до конца 20 века. И, как показано в первой главе нашего исследования, эта модель в настоящее время представлена в нормативных документах [230,26,76,104] в общем виде типа:

$$F = K \cdot D \cdot H \cdot C_A, \quad (3.2.1)$$

где K – комплексный коэффициент учитывающий форму опоры (D) и плотность ее контакта со льдом толщиной H ; C_A – параметр прочности льда, определяемый испытаниями кубиков льда на одноосное сжатие. Эта модель описывает «расчетный» контакт кромки дрейфующего ледового поля с жестким неподвижным сооружением и до обнаружения возможности возникновения вибрации массивного сооружения типа Моликпак [360] в аналогичных условиях всегда применялась для такого класса сооружений.

Эта российская модель (скорее просто формула, называемая на западе *«формула Коржавина»*) расчета ледовой нагрузки не предполагает описание взаимодействия сооружения со льдом именно **как процесса разрушения льда**. Здесь рассматривается условная схема контакта опоры и торцевой грани ледового поля и записывается сила давления льда на некоторую жесткую поверхность неподвижной опоры. Предел временной прочности льда при сжатии считается предельным значением контактного давления. Считается, что такое состояние остается неизменным на протяжении любого времени контакта, то есть, **априори признается неизменность и непрерывность процесса разрушения льда**.

Как альтернатива российской методологии расчёта ледовой нагрузки в 60-х годах прошлого века появились модели «непрерывного разрушения льда». Эти модели создавались с целью **описания процессов на контакте льда с опорой** во времени, они должны были основываться на законах сохранения энергии и др.

Основной гипотезой этих моделей является гипотеза о разрушения льда путем **дробления** в момент достижения наибольших значений давления льда на контакте. "Дробление" – это общее описание разрушения льда на мелкие частицы. Принятая гипотеза предполагает также, что лед **должен быть разрушен** (раздроблен, раскрошен, смят) под всей поверхностью контакта, поэтому очевидно, что должен иметь место реальный **поток продуктов разрушения льда из центра контакта к его периферийным зонам**. Таким образом, рассматриваемые модели должны описывать 2 процесса **непрерывного разрушения льда с одновременным выдавливанием** продуктов его разрушения из зоны контакта, то есть **единого процесса раздавливания-экструзии**. (Такое тип взаимодействия льда с опорой в

реальных процессах характерен только для относительно «теплого» льда, не обладающего существенным сопротивлением внедрению. – авт.)

3.3.1.1 Гидродинамическая модель разрушения – экструзии льда

Первой из моделей такого класса была модель внедрения твердого тела в массив льда разработанная Хейсиным Д.Е., Курдюмовым В.А. и Лихомановым В.А. в 1970–76 г.г. [67,114,111,113,112]. Они считали, что процесс разрушения можно представить описанием **модели НЕПРЕРЫВНОГО процесса выдавливания мелкодисперсного слоя измельченного смятого льда** из зоны между бортом судна и массивом ненарушенного льда. Они назвали свою модель, которая была разработана для математического описания процесса разрушения кромки льдины с поверхностью судна – **ГидроДинамической Моделью (ГДМ)** [67]. **Основанная на модели методология** определения локальных ледовых нагрузок на корпус судна была реализована в требованиях Правил Регистра [90].

В этой модели эпюра распределения давления на контактной поверхности была принята *гладкой в форме параболы*. Разработке этой модели предшествовало исследование процесса удара о поверхность ледяного покрова стальных полусферических отливок массой 156 и 300 кг в диапазоне скоростей 0,1 – 6 м/с. Продолжительность удара составляла около 0,01 с. В своей модели – гипотезе авторы предположили, что пластические деформации в массиве льда за пределами зоны контакта не будут успевать развиваться, а упругие деформации также будут незначительны. Эксперименты по методу, позднее названному DBT (*Drop Ball Test* – испытания падающими шарами) показали, что между поверхностью внедряющегося тела и массой неразрушенного льда *в каждый момент процесса внедрения*, т.е. на всем протяжении процесса взаимодействия, существует сравнительно *тонкий промежуточный слой мелкодисперсной крошки льда* (Рисунок 3.3.1), образовавшийся в начале контакта из смятых осколков льда.

Анализ плоских шлифов из выпиленных кернов под местами ударов показал существование частиц льда субмикроскопических размеров [30,111], рассеянных среди обломков кристаллов, которые являются смазкой как внутри матрицы, так и на границах слоя продуктов разрушения льда с жесткой поверхностью внедряющегося тела и с жесткой границей неразрушенного («целика»), льда, что в комплексе создает условия для выдавливания всего слоя из зоны контакта.

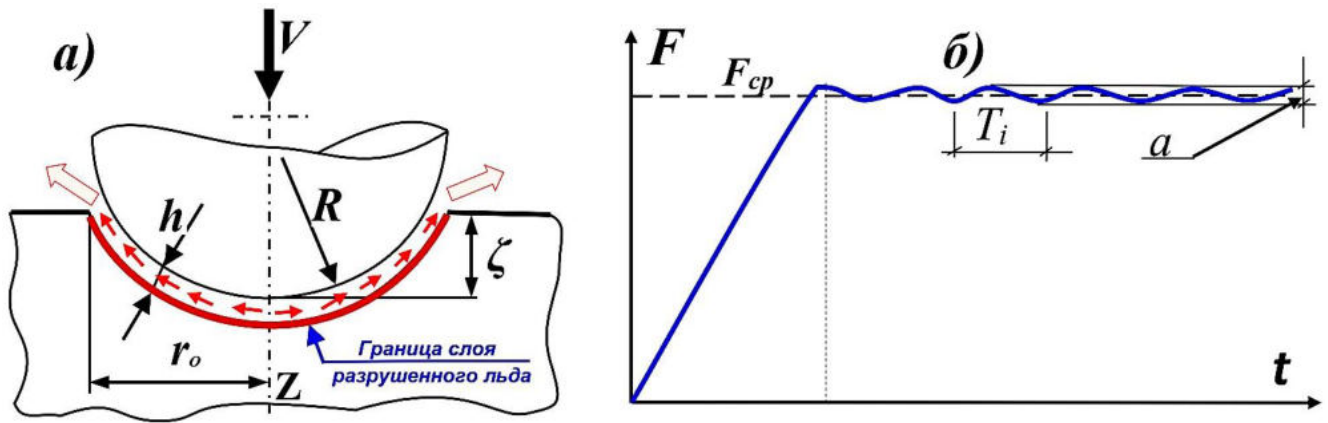


Рисунок 3.3.1 Гидродинамическая модель Хейсина Д.Е. с соавторами [67, 112]: а) – схема выдавливания продуктов разрушения льда; б) – возможный график контактной силы для взаимодействия ЛП с МЛО;

Модель группы Хейсина Д.Е. включает **выдавливание раздробленного льда в процессе постепенного роста контактного усилия** (Рисунок 3.3.1,б) и приближение к нулю толщины слоя h (Рисунок 3.3.1,а). Что происходит при приближении к нулю толщины слоя смятого льда? По гипотезе авторов, достигшее предельного для льда значение контактного давления (*распределенного по площади контакта по параболе*) **снова вызывает его дробление**, при этом [67] “*поверхность разрыва движется впереди поверхности, внедряющейся в лед*”. То есть спрессованные продукты разрушения льда -

Наличие мелкодисперсного слоя разрушенного льда и явление его выдавливания из зоны контакта после опубликования работ группы Хейсина Д.Е. [67,114,111,113,112] также отмечали и другие авторы, проводившие аналогичные по постановке эксперименты крупного, среднего и мелкого масштабов [184,198,238, 248,301,290,361,30,126]. В отдельных работах [238,301,30], как и в работах группы Хейсина Д.Е., также было зафиксировано наличие четкой, без переходных областей, характерной границы между разрушенной массой обломков кристаллического льда в промежуточном слое и «целиком» ледяного массива (Рисунок 3.3.2, а, б).

Следовательно, если изобразить **процесс «непрерывного внедрения»** как процесс взаимодействия ЛП с МЛО по ГДМ, изменение **контактного усилия во времени $F(t)$** для случая *их длительного взаимодействия* может иметь вид, приведенный на Рисунок 3.3.1,б: после начала разрушения сила контакта F имеет некоторые переколебания с периодом T_i от уровня среднего значения F_{cp} , слабо от него отклоняясь в пределах некоторой амплитуды a . Все эти параметры зависят от скорости взаимодействия индентора со льдом V и от прочностных параметров льда.

Но авторы группы Хейсина Д.Е. [67,113] при описании процесса соударения сферы со льдом полагали, что можно **пренебречь начальной и конечной упругими фазами**, а доминирующим процессом является **движение массы промежуточного слоя**, как вещества,

обладающей вязко – пластическими свойствами. Этот процесс авторы описывают системой уравнений Генки для вязко-пластического тела. Этими уравнениями авторы выполняют **математическое описание процесса экструзии** из контактной зоны **«промежуточного слоя» уже раздробленного льда**, представляющего собой вещество пастообразной или порошкообразной консистенции и содержащего также некоторое количество жидкой фазы (тепло при разрушении льда плавит часть осколков его кристаллов в зонах переуплотнения).

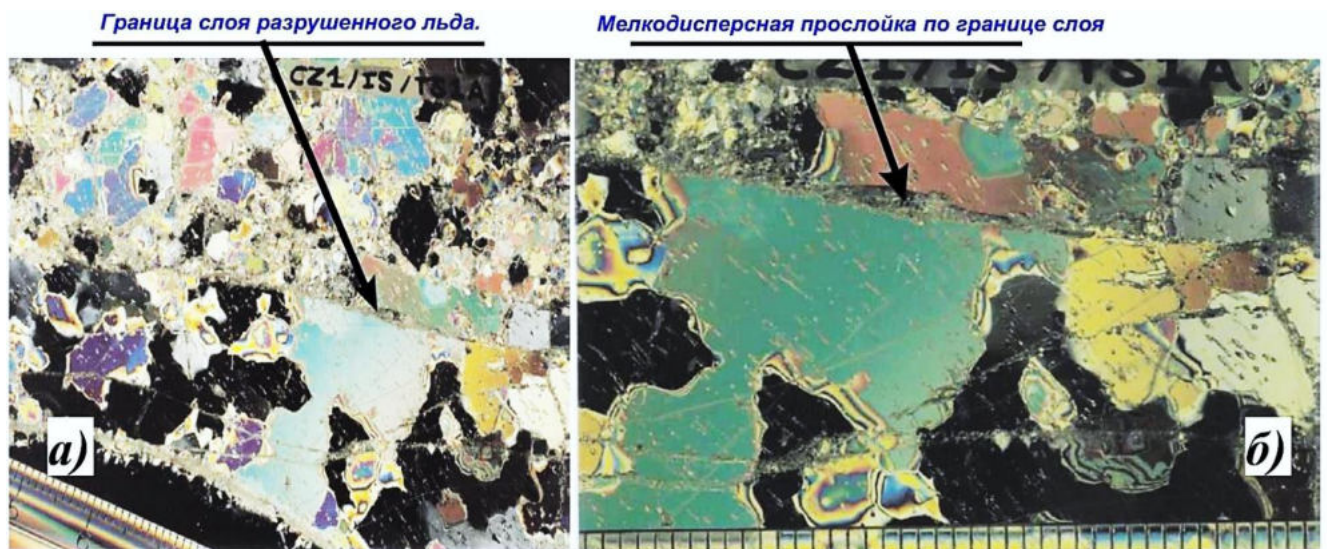


Рисунок 3.3.2 Микрофотография границы между массивом ненарушенного льда («целиком») и нарушенным слоем льда по Jordaan I. [67, 112]: а) – целые кристаллы льда с разными направлениями оптических осей ниже границы, выше – крошка из обломков кристаллов; и б) – прослойка мелкодисперсной крошки

Первичное раздробление льда, по гипотезе авторов [67] происходит при превышении предела его прочности при динамическом сжатии в массиве, а дальнейшее смятие обломков происходит при превышении значениями давления внутри слоя разрушенного льда предела прочности на одноосное сжатие льда в процессе выдавливания обломков и крошки и стремлении к нулю толщины этого слоя. Исходя из условий динамичности процесса, предельные расчетные контактные давления рассчитывались путем интегрирования графика импульса ускорения, регистрируемого в эксперименте. Эти расчетные давления оказались в очень хорошей корреляции с удельной энергией разрушения льда, определялись в результате эксперимента: $p_{max} = k \cdot \epsilon_{cr}$, $k \approx 99,5\%$.

Удельная энергия разрушения льда ϵ_{cr} (дж/г) – важная характеристика динамической прочности льда, как материала, определялась авторами экспериментов [67,114,111,113,112] по методу, подобному определению динамической твердости льда другими российскими исследователями ранее – путем отнесения энергии падающего тела к объему отпечатка во льду [141]:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{U_{cr}}{W_{cr}}; \quad U_{cr} = M \cdot g \cdot H; \quad W_{cr} = \pi \cdot \zeta_{max}^2 R, \quad (3.2.2)$$

где: U_{cr} – затраченная на разрушение льда энергия тела массой M , сбрасываемого с высоты H ; W_{cr} объем образовавшейся лунки, определяемый как объем сегмента параболоида вращения; ζ – значение глубины отпечатка, вычисляемое по значению $d_0 = 2r_0$ (Рисунок 3.3.1а).

Эксперименты этой группы исследователей показали, что *удельная энергия ε_{cr} является достаточно стабильной величиной*. Отклонения значения $\Delta \varepsilon_{cr}$ от средних значений в каждом опыте распределяются по нормальному закону и практически не превышают $\pm 2\sigma_{\varepsilon}$. Как показал анализ результатов исследований, разброс значений величины ε_{cr} , полученных экспериментально, значительно меньше, чем у таких механически характеристик как пределы прочности натурального льда на сжатие и изгиб, определяемых на малых образцах. Так как *зависимость величины ε_{cr} от температуры не была установлена*, поэтому практическое использование результатов этих экспериментов весьма затруднительно.

Но, как указывают сами авторы из группы исследователей Хейсина Д.Е., полученные в их исследованиях **значения удельной энергии механического разрушения льда ε_{cr}** являются весьма приближёнными, поскольку они не смогли количественно оценить затраты энергии удара на образование «зоны предразрушения» - т.е. множества трещин в массиве льда, а также больших и мелких сколов кусков льда на его поверхности. Энергия на выделение теплоты при ударе и кинетическая энергия полёта осколков льда также не учитывались. Не учитывали исследователи также и энергию упругих волн, излучаемых в массив льда при ударе тела о его поверхность и энергию изгибных колебаний ледяного покрова.

Разработанная *модель Хейсина–Курдюмова–Лихоманова* удара тела о лед хорошо описывала лишь экспериментальные данные конкретного эксперимента, она *не носит универсального характера*. Ее применение к процессам длительного контакта ЛП с МЛЮ поскольку в ней исключен главный процесс такого взаимодействия – *процесс разрушения льда, напрямую не представляется возможным*. Тем более, учитывая исследования последних десятилетий по регистрации реальных ледовых нагрузок на сооружения, имеющих ярко выраженный циклический характер, применение такой модели может быть фрагментарным, например – для описания процесса очистки зоны контакта после акта разрушения льда по контакту с опорой. На рисунке 3.2.1,б нами условно показан возможный график контактной силы при длительном взаимодействии ледового поля с преградой, который может иметь место только при слабом («теплом») льде.

Хотя моделирование с использованием рассмотренной модели Хейсина Д.Е. с соавторами было широко признанным, но Tunik A.L., например, в 1989 году представил свой

вывод о том, что практическое применение **метода выдавливания слоя** ограничено недостатком экспериментальных данных для полномасштабных ситуаций. Эта форма описания предельного давления льда была использована для того чтобы сформулировать математическую модель (формулу) для расчета контактной силы льда с использованием энергетических принципов при ударе между ледовым объектом и кораблем (Попов и др. 1968).

Недостатком этой формулировки давления льда является то, что было сделано много предположений (вязкость, равномерная толщина пленки, равномерный источник измельченного льда, постоянная толщина пленки, чтобы упомянуть несколько). **Таким образом, эта формулировка не получила большого применения за пределами России**, за исключением разработки новых правил ледового класса Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО) – этих правил более поздних.

Подход Хейсина Д.Е. с соавторами к описанию процесса взаимодействия жесткого индентора со льдом в 1986 г. был применен Nevel, D.E. [308], который разработал модель силы удара айсберга, основанную на теории вязкости. На основании специального изучения экструзии дробленого льда в серии экспериментов [188,208], Jordaan et al. [241] признали важность одновременно протекающих процессов скалывания блоков льда и экструзии его обломков и крошки, на основании чего ими была разработана аналитическая модель для случая вдавливания сферического индентора в лед.

3.3.1.2 Модели непрерывного послойного разрушения льда на поверхности контакта с индентором

Основой моделей «непрерывного разрушения» льда, как показано в предыдущем подразделе, является концепция выдавливания «продуктов разрушения льда», предложенная Хейсиным и др. [74]. В развитие этого подхода в работах Kennedy и др. [258], Varsta P. и Riska K. [121], Апполонова Е.М. с соавторами [149,150,6] и ряда других, такие продукты разрушения льда появляются как результат послойного перехода «твердого льда», находящегося за границей (фронтом) разрушения в виде слоя предразрушения, под воздействием роста контактных давлений, в слой раздробленного льда – крошку (Рисунок 3.3.2). Качественную картину явления внедрения жесткого тела в массив льда авторы ряда исследований уже после 1980-х [184,198,238,241,248,290,301,345,361,126] описывают **двумя стадиями**.

Наиболее характерные модели, описывающие двухэтапный процесс разрушения льда на контакте поверхности сооружения с кромкой ледового поля (раздробления и экструзии крошки льда), так называемые **«зонные» модели**, были построены и исследованы Jordaan и Timco [241,361], Kärnä и Turunen [248] и другими [184,123,126]. Авторы этих

работ используют похожие подходы, представляя лед ледового поля несколькими зонами (Рисунок 3.3.3 – 3.3.5): в удалении от контактной зоны лед находится в первозданном состоянии; ближе к контактной поверхности находится слой льда сильно поврежденного трещинами; между этим слоем и поверхностью сооружения формируется слой разрушенного льда (ледяной крошки).

Средняя глубина *слоя разрушения* по различным исследованиям и расчетам может составлять от $0,05 \div 0,15$ [23] или «от 0,1 до 0,5 толщины ледяного покрова – в среднем около трети толщины льда h », как показано на рисунке 2.2.27, а [345]. Лабораторными исследованиями установлена зависимость глубины *слоя разрушения* от соотношений D/h , а также V/h [345].

В качестве «текущего момента» процесса контактного взаимодействия в подобных моделях часто принимается, что *прямой контакт* твердого тела со льдом отсутствует, но энергия массиву ненарушенного льда передается через тонкую сильно уплотненную прослойку продуктов смятого льда, как показано на рисунках 3.3.3 – 3.3.5. Затем *происходит резкое «местное раздробление поверхности льда»* и **образование** развитого **промежуточного слоя** – как результат раздробления.

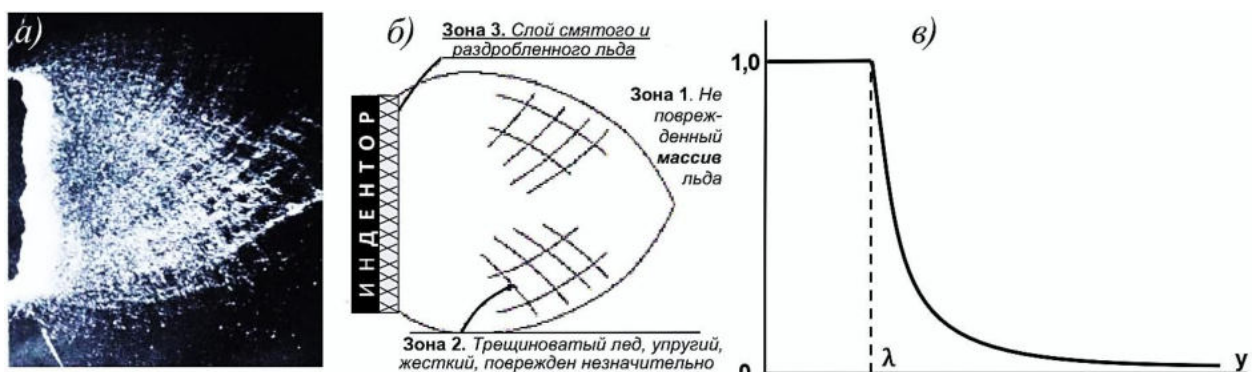


Рисунок 3.3.3 «Модель разрушенного слоя» по Jordaan и Timco [241]

При дальнейшем внедрении тела происходит **выжимание (экструзии) промежуточного слоя** – это **вторая стадия**, при достаточно интенсивных воздействиях *эта стадия по затратам энергии и по времени процесса является доминирующей*. При уменьшении толщины выжимаемого слоя продуктов разрушения льда до некоторой малой величины (все авторы не акцентируют этот момент) начинает нарастать **процесс накопления упругих деформаций** (упругой энергии) в приграничном поверхности разрушения предшествующего этапе массива льда, затем повторяется разрушение льда и выдавливание крошки.

Но в этих моделях получил развитие также и некоторый описательный подход к процессу контактного разрушения льда. Он содержал, помимо стадии экструзии раздробленного льда из зоны контакта, предшествующую ей стадию раздробления слоя льда (Рисунок 3.3.3 и 3.3.4). Например, Timco и Jordaan (1987, 1988) [361,241] предложили модель, описывающую реальный процесс накопления повреждений в слое льда перед внедряющейся

моделью опоры в процессе роста контактных давлений (Рисунок 3.3.3) при уменьшении толщины слоя выдавливаемых обломков и крошки льда.

На схеме на рисунке 3.3.3,б авторы показали распределение напряженно-деформированных областей в зоне контакта, соответствующих реальной картине процесса разрушения льда, показанной на фотографии на рисунке 3.2.3,а. Как видно из фотографии (Рисунок 3.3.3,а), с удалением от контактной поверхности количество дефектов-трещин в плите льда уменьшается. Основываясь на этом, авторы рассматриваемой модели [241] приняли распределение дефектов по направлению прорезания опорой ледовой плиты (y) согласно закону, приведенному на рисунке 3.3.3,в.

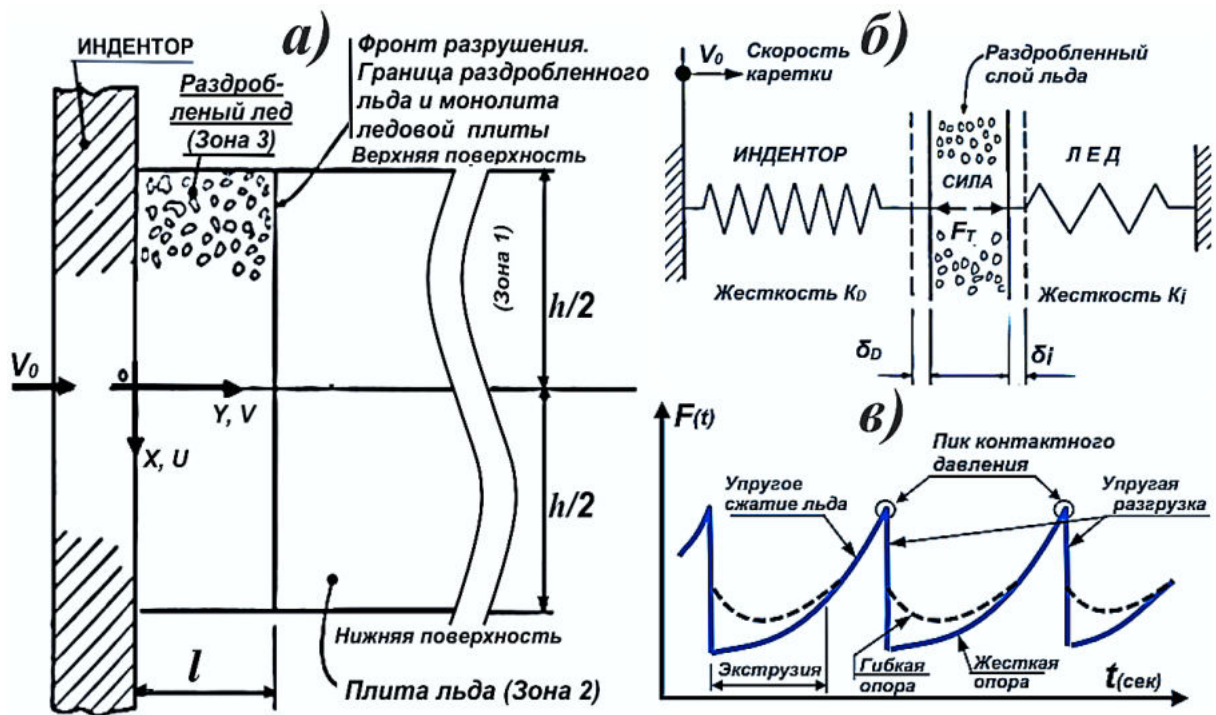


Рисунок 3.3.4 Модель послойного разрушения льда по Jordaаn и Timco [67, 112] – (а), ее механическое представление – (б) и график циклов разрушения слоев льда – (в)

В работе [361] эти же авторы выделили стой разрушенного льда в отдельную самостоятельную субстанцию с неизвестными параметрами жесткости (Рисунок 3.3.4, а,б), в отличие от сооружения и неразрушенного льда ледового поля. Здесь максимальная нагрузка на опору от давления льда достигается в момент разрушения слоя льда (Рисунок 3.3.4,в), накопившего предельное количество микротрещин в результате их слияния и их спонтанного распространения на **некоторую глубину l** в массив льда.

Все исследователи, предлагавшие модели «непрерывного разрушения льда» [74,238,241,247,248,339,361,365,30,67,111,126] на основании общих физических представлений и экспериментальных наблюдений, в т.ч. с учетом феноменологических свойств льда как материала и его 3-х мерного разрушения, предполагают, что в таких моделях усилие, требуемое для выдавливания раздробленного льда, увеличивается

постепенно, с приближением к нулю толщины слоя l (Рисунок 2.2.4, в). После чего нагрузка падает и причиной этому может быть только развитие трещин в следующем преднапряженном слое упруго сжатого льда. Характер падения нагрузки при этом может быть различным. Модели некоторых авторов, например [361], предлагают описывать процесс периодического нагружения слоя льда и его *резкой разгрузки* – как результата разрушения льда, в виде, приведенном на графике контактной силы на рисунке 3.3.4, в.

Так что происходит при приближении к нулю толщины слоя смятого льда? Авторы большинства рассматриваемых моделей [241,248,361,6,67], в том числе на основании результатов экспериментальных исследований, прямо или косвенно указывают, что появляется **прямой контакт поверхности тела с жестким «целиком» льда** и это вызывает *рост контактных давлений и разрушение льда в месте такого контакта*, затем следует снижение контактного давления и переход к стадии смятия и экструзии обломков льда, как, например, на Рисунок 3.3.4., в.

Перспективным шагом при разработке подобной же модели послойного разрушения льда на контакте с опорой Kärnä и Turunen (Рисунок 3.3.5, а – [248]) впервые выделили отдельным элементом в активной системе взаимодействующих ледового поля и сооружения «процесс дробления льда» в зоне непосредственного контакта жесткой поверхности со льдом (Рисунок 3.3.5,б). Это важное наблюдение, заключающееся в том, что этот процесс может быть различным, в зависимости от сочетаний параметров льда и ледового поля – с одной стороны, и опоры МЛО – с другой, но и в этой модели механизм разрушения льда не рассмотрен.

Таким образом, если рассмотреть внедрение тела в лед в моделях «непрерывного внедрения», в том числе в ГДМ и других, их авторы предлагают описывать процесс внедрения – как процесс непрерывного «выдавливания продуктов разрушения льда», которые всегда образуются в средней части контакта (Рисунок 3.3.1, а), где давления превышают предельные.

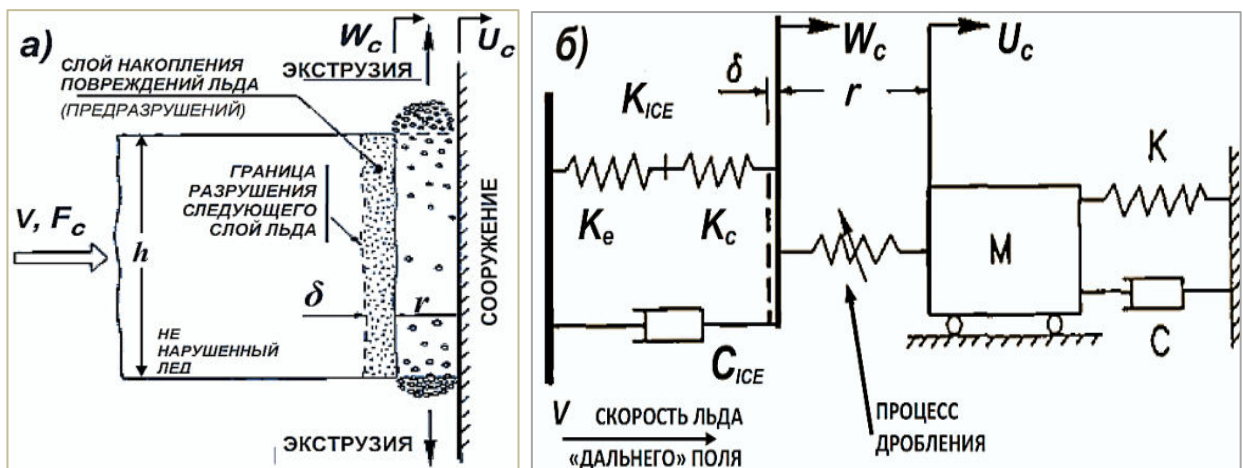


Рисунок 3.3.5 Феноменологическое представление модели послойного разрушения льда (а) по Kärnä и Turunen [67, 112] на опоре сооружения и ее

интерпретация в виде механической модели (б)

Пути движения выдавливаемой «массы разрушенного льда» показаны стрелками на этом же рисунке. Вопрос о том, *что происходит в массиве льда в тех зонах, по границам которых наблюдается трафик продуктов его разрушения* необходимо было тщательно исследовать, потому что в рассмотренных моделях их авторы приписывают этим границам свойства твердого и жесткого тела, а *«переход льда от неразрушенного состояния к разрушенному»* в том числе и в этих периферийных зонах *в рассмотренных моделях остается открытым*. Это самый большой недостаток этих моделей – они *не описывают процесс разрушения льда по всей площади контакта и не включают описание периода контакта*, поэтому **такие модели не дают возможности выявления источника генерации циклической ледовой нагрузки при разрушении льда**.

3.3.2 Развитие моделей непрерывного разрушения льда

Различные авторы отмечали, что экспериментальные исследования Хейсина Д.Е. с соавторами [67,112] *не включают прямое измерение давления в зоне контакта со льдом*, поэтому их основную концепцию этой модели о распределении контактного давления по *очертанию гладкой параболы невозможно проверить непосредственно экспериментом*. Но исследования явления контактного разрушения льда продолжались как в теоретических разработках, так и экспериментальных. Характерным примером является выполненное в 1994 году исследование Kennedy с соавторами [258]. Здесь авторы отмечают, что взаимодействие льда и структуры приводит к разрушению одного материала – континуума (неповрежденный лед) и появлению нового континуума (измельченного льда), а непосредственное наблюдение за процессами разрушения и экструзии в реальном времени невозможно, информация о параметрах процесса становится доступна только после теста, причем неполная. Авторы разработали и реализовали «среднемасштабный» метод мониторинга процессов образования дробленого льда и изменения давлений на контакте [258] (Рисунок 3.3.6,а,в).

В качестве важных наблюдений в результате исследований Kennedy и др. [258] можно считать детализацию картины разрушения и выделение **зоны боковых сколов льда** по контуру отпечатка сферы (Рисунок 3.3.6,б). Ими были исследованы и две модели, которые рассматривают распределение давления крошки льда при равномерной толщине выдавливаемого слоя льда по поверхности сферы и по схеме *трехмерной эллиптической поверхности* с уменьшением толщины слоя к центру контакта (Рисунок 3.3.6, г). При этом толщина слоя на краю «горячей точки» в модели принимается вдвое превышающей толщину слоя в центре, с квадратичным изменением значений от края к центру

контакта. Значения давлений, посчитанных по предложенной модели, имеют полное соответствие со значениями давлений, измеренных в эксперименте; $p_{\max} = 11$ МПа при максимальной силе $P = 4,2$ МН.

Другим важным аспектом, полученным в эксперименте [258], является запись **циклического характера нагрузки**: появление пика, вызывающего разрушение слоя льда (Рисунок 3.3.6, д) и спада нагрузки на стадии экструзии крошки. Параметры этого процесса, как отмечают авторы, зависит от множества факторов, включая местный режим давления, эффекты площади, распределение дефектов во льду и степень их локализации. Но на данном этапе работы *авторам не удалось изучить и описать механику разрушения льда* в напряженной «горячей точке».

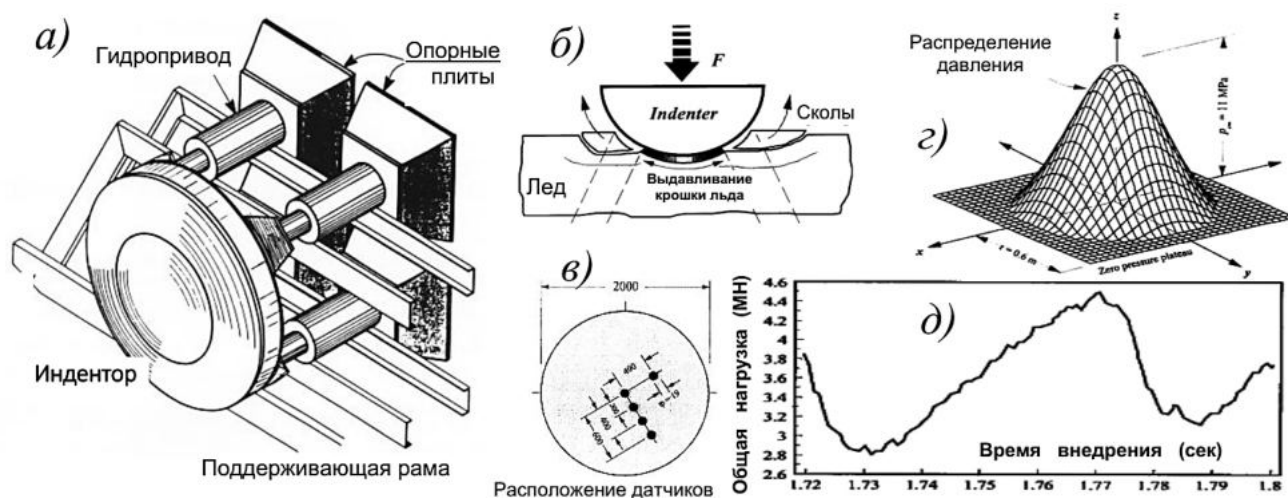


Рисунок 3.3.6 Четырехцилиндровая система вдавливания индентора среднего масштаба (3 м²) с регистрацией **циклов разрушения** во времени по Kennedy и др. [258]

Анализ результатов экспериментов других исследователей разрушения льда при его взаимодействии с твердым телом *методом DBT* (Timco и Frederking, [356,357]) и Апполонов Е.М. с соавторами [149,150,6]; наконечниками (Frederking, Jordan and McCallum [198]); а также результаты лабораторных (Varsta P. и Riska K. [121]) и полномасштабных измерений давлений льда на корпуса судов, оснащенных специальной системой для построения эпюры давлений в зоне контакта корпуса со льдом (Masterson and Frederking [290]), а также на поверхность большего размера индентора в траншее в массиве льда айсберга (Kennedy и др. [258]) – все эти исследования показали **наличие выраженных пиков давления** льда на площади контакта, что *противоречит теоретическому представлению авторов ГДМ о гладкой эпюре контактного давления льда*. К такому же выводу пришли Gagnon R.E. и Gammon P.H. [201,206], проводившие мелкомасштабные испытания образцов льда в обоймах на удар телом со сферической ударной частью.

3.3.2.1 Двухпараметрическая модель непрерывного разрушения льда

Исследователи из ЦНИИ им. Крылова Апполонов Е.М. с соавторами с целью уточнения гидродинамической модели (ГДМ), с учетом опыта исследований по данной теме других исследователей [198,290,356,357,121,30,67,113,126,129] **выполнили эксперименты** с использованием специально разработанного копра, обеспечивающего соударения жестких полусфер различной массы с различной начальной скоростью соударения со льдом, имеющих ударную поверхность со встроенными датчиками давления (ARCDEV-проект) [149,150,6].

Авторы этой модели, на основе анализа качественной картины разрушения льда в приложении к взаимодействию борта судна с ребром кромки льда при его местном смятии, расположили **область прямого контакта тела со льдом** в середине зоны контакта и предложили ее описывать путем задания ее ширины b_0 и *среднего* давления p_m (Рисунок 3.2.7,в).

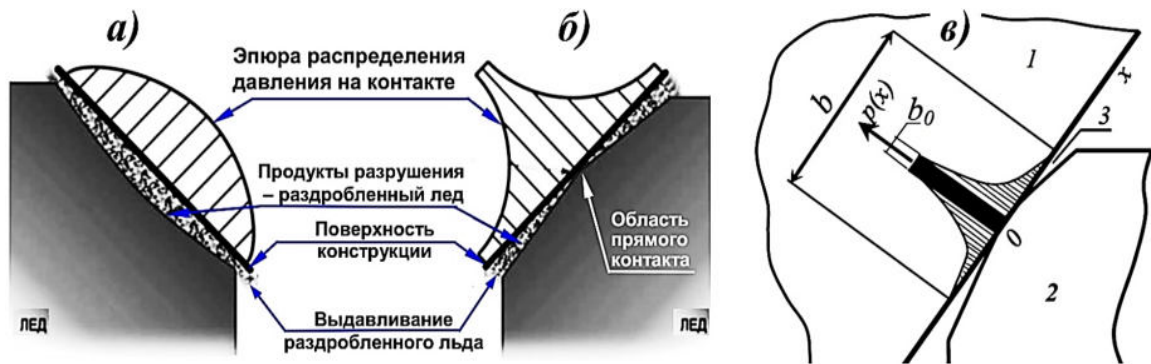


Рисунок 3.3.7 Модифицированная гидродинамическая модель Апполонова Е.М. с соавторами в сравнении с ГДМ Хейсина Д.Е. с соавторами: а) – эпюра давления по ГДМ; б) – эпюра давлений при прямом контакте тела со льдом и выдавливанием продуктов разрушения льда по [150,6]; в) – расчетная схема для определения ледового давления на борт судна в рамках МГДМ [149,150,6]

С двух сторон от **зоны прямого контакта** располагаются зоны мелко разрушенного льда, который вытесняется на периферийные участки контактной зоны в процессе внедрения тела в лед. В области **прямого контакта** вдоль оси симметрии давления на поверхность тела имеют **выраженный пик** (Рисунок 3.3.7,б), а к краям контактной зоны они интенсивно убывают, отражая распределение плотности выдавливаемой массы разрушенного льда от центра к краям зоны. Гипотеза, описывающая появление, развитие и распад таких зон прямого контакта льда с сооружением приведена в следующем разделе.

Для полного учета изложенных экспериментальных данных этими исследователями, учитывая исследования Varsta P. и Riska K. [121] о наличии в исследуемом явлении **прямого контакта** поверхности тела с «целиком» массива льда и необходимостью использования принципа суперпозиции в описании явлений внедрения тел в лед с его

разрушениями, Апполонов Е.М. с соавторами [149,150,6] предложили **модель динамического разрушения льда и модифицированную ГДМ (МГДМ)**. Эта модель по своей логике учета феноменологии процесса близка к модели автора [123,126], учитывающей комплексный характер локального разрушения льда, **включающий уже два параллельных процесса:**

- *разрушение льда как твердого тела в области прямого контакта;*
- *вытеснение разрушенного мелкодисперсного льда.*

То есть максимальные давления создаются в центре контакта, где промежуточный слой отсутствует, а с увеличением толщины промежуточного слоя к краям зоны давления уменьшаются. В рамках ГДМ имеет место обратная ситуация: максимальные давления возникают в области максимальной толщины промежуточного слоя (Рисунок 3.3.7,б), *что противоречит логике.*

В *модифицированной гидродинамической модели* (МГДМ) [6] наличие действительного пикового характера эпюры давлений предлагается учитывать путем введения *эффективной площади контакта b_0* (Рисунок 3.3.7, в). в пределах которой давления считаются постоянными, а вне ее — равными нулю. Переход к эффективной площади контакта осуществляется с помощью *параметра пиковости α* , равного отношению эффективного и фактического размеров зоны контакта.

В ГДМ и МГДМ использовался исключительно **силовой подход** для определения контактных давлений, в том числе применялись как расчеты давлений по взаимосвязи с **удельной энергией разрушения льда**, определяемой экспериментально (ГДМ), так и прямое измерение их значений по показаниям датчиков (МГДМ). Это позволило Апполонову Е.М. с соавторами [149,150,6] в их модели конкретно показать, что непосредственное **разрушение льда происходит на площадке «прямого контакта»** в центральной части зоны взаимодействия.

ВЫВОДЫ по разделу

Как можно видеть из анализа публикаций, посвященным моделям непрерывного прорезания льда на контакте ледового поля с сооружениями, **процесс разрушения льда** — как результат **передачи энергии движущегося тела к «целику» льда** и ее накопление в массиве в упругом виде непосредственно **не исследовался и не описывался** как явление, обеспечивающее периодическое разрушение льда при внедрении жесткой поверхности в массив льда.

В исследованных моделях авторы, как правило, осуществляют **замену явления разрушения монолита льда** другим явлением — **процессом выдавливания продуктов разрушения** льда из зоны контакта т.е. постоянным процессом «очистки» контакта - выдавливания. *Факт существования границы между разрушенным льдом и неразрушенным не говорит о том*, что это подтверждает гипотезу Хейсина Д.Е. с соавторами о

существовании *постоянно длящегося процесса* перехода льда из неразрушенного состояния в разрушенное. Однако передача через даже минимальный промежуточный слой уплотненной крошки льда необходимого объема упругой энергии для разрушения его целика в массиве не может быть достигнута, необходим прямой контакт твердых поверхностей индентора и преграды. Необходимо тщательно исследовать зону непосредственного контакта льда с внедряющейся поверхностью.

3.3.3 Концептуальная модель комплексного разрушения слоя льда – как цикл ледовой нагрузки²

Простой анализ рассмотренных экспериментально–теоретических моделей внедрения твердого объекта в ледовый массив показали, что описать условия развития всех таких процессов одним из классических критериев прочности практически невозможно. Но, в рассмотренных работах есть апробированная гипотеза о применении интегрального критерия разрушения, который учтет все виды деформирования льда и механизмы его разрушения его напряженного объема и даст возможность рассчитать суммарный эффект. Эта гипотеза, предложенная в «Гидродинамической модели удара твердого тела о лед», показала [67,112] «работоспособность» интегрального энергетического критерия, в отличие от силовых критериев – удельной энергии разрушения ε_{σ} , основные параметры модели описаны в одном из предыдущих разделов. Выше также представлена модифицированная гидродинамическая (энергетическая) модель [149,150,6], включающая в учет контактной площади зоны «прямого контакта», которые достаточно глубоко и широко исследованы иностранными исследователями [240,242,243,270,121,296], но предложившими только статистическое описание явление без построения математической модели механизма разрушения льда.

Авторы ряда работ, как показано выше [241,248,361,6,67], используют такие же как и в работах с «энергетическим» подходом, элементы представления массива льда в торце ЛП – зонами (Рисунки 3.2.4 и 3.2.5): в удалении от контактной зоны лед находится в первозданном состоянии; ближе к контактной поверхности находится слой льда сильно поврежденного трещинами; между этим слоем и поверхностью сооружения формируется слой разрушенного льда (ледяной крошки). Очевидно, что с повышением прочности льда такие модели могут описывать периодический процесс разрушения льда и, соответственно, периодическое изменение амплитуды (A) и периода (T) появления пиков ледовой нагрузки F на сооружение (Рисунок 3.3.8, с). Таким образом, механизм послойного разрушения льда

² Ранее такого рода модель была предложена автором в работах [Ошибка! Закладка не определена.,Ошибка! Закладка не определена.,Ошибка! Закладка не определена.]

при относительно высокой его прочности *может и должен* моделировать *генерирование циклической ледовой нагрузки* на сооружение, вызывая его колебания. Но никто из указанных авторов не предложил конкретную модель с математическим описанием процесса накопления – сброса *энергии упругих деформаций* в слое льда, вызывающего колебания сооружения.

С учетом результатов анализа описаний сущности явлений разрушения льда названными моделями и созданных ими предпосылок, нами, на основании экспериментально-теоретических исследований [117,115,132 – 134], была разработана *новая модель – модель послойного комплексного разрушения льда*, основанная на применении в качестве *критерия разрушения льда – удельной энергии разрушения ϵ_{cr}* [126,123]. Графически эта модель представлена на Рисунке 3.3.8,с и 3.3.9. Эта энергетическая модель, в которой *преобразование аккумулированной упругой энергии* в слое в поверхностную энергию обломков *происходит скачком* в конце процесса увеличения контактного давления в момент достижения в слое предразрушения льда предельного значения потенциальной энергии деформации *основана на следующей гипотезе*.

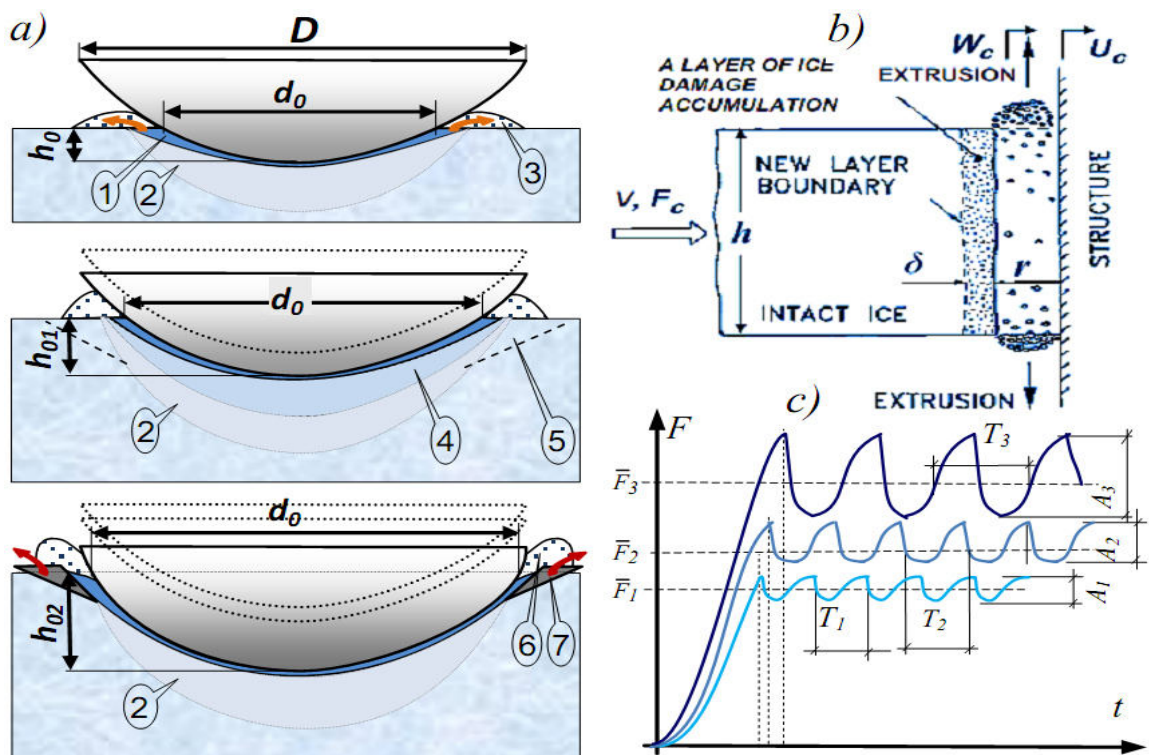


Рисунок 3.3.8 Модели послойного разрушения льда: а) по Хейсину и др. [67,112], Цуприку [365,123,126,133,129] и Апполонову и др. [149]; б) по Kärnä и Turunen – 1989 [248]; в) графики контактной силы в предлагаемой модели комплексного послойного дробления для разных значений жесткости льда при постоянной скорости движения ЛП

В структурно-энергетической интерпретации процесса упругопластического деформирования напряженного объема льда следует исходить из предположения о

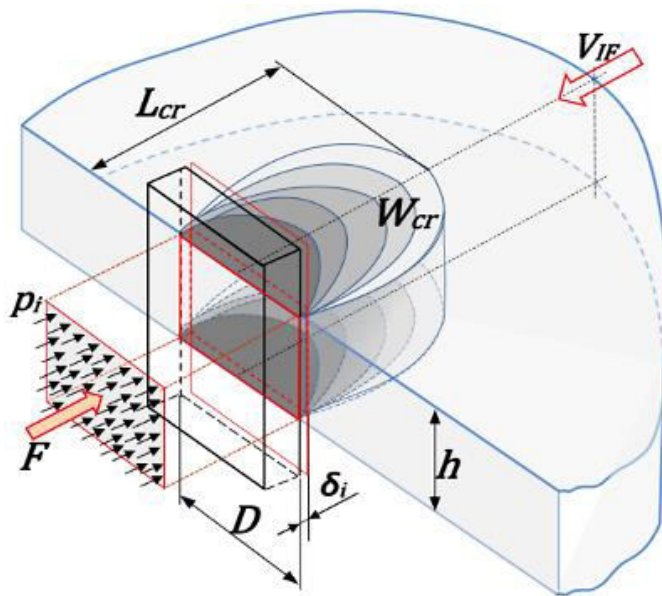


Рисунок 3.3.9 Основные параметры зоны накопления плотности энергии упругой деформации в массиве льда на контакте ЛП с МЛС – как создания слоя предразрушения льда при взаимодействии ЛП с МЛО

существовании трансформационного энергетического процесса, в котором кинетическая энергия ледового поля в процессе его давления на жесткую неподвижную опору, создает энергетический поток волновой природы в массиве ледовой плиты, прилегающем к зоне контакта. Следовательно, разрушение льда следует рассматривать с нескольких позиций: статистической физики – как многоэтапного, пространственно – временного процесса накопления и развития нарушений сплошности материала (дефектов его структуры) [43,73]; феноменологической термодинамики [109]; волновой теории [54,78].

Эти подходы к описанию процесса разрушения, опираясь на фундаментальные законы сохранения, показывают, что внешняя *сила не сама разрывает внутренние связи*, а лишь активизирует процесс их разрыва энергетическими флуктуациями, увеличивая вероятность таких разрывов. Исходя из этого, внешняя сила только обеспечивает направленность разрывного действия флуктуаций и развитие процесса разрушения, как протекающего во времени *единого процесса накопления нарушений в структуре льда и накопления упругой энергии в его объеме*. Энергетические флуктуации поступают во все точки напряженного объема льда в виде потока энергии, переносимого волнами сжатия – растяжения [54,78], имеющими некоторую естественную для данного состояния льда в данных природных гидрометеорологических условий объемную плотность механической энергии, вовлеченных в процесс передачи импульса энергии частиц льда.

Сущность феноменологического явления зарождения трещин, а также их развития состоит в том, что на эти процессы необходимо затратить *вполне определенное количество упругой энергии деформации на единичный объем льда*, которая в волне напряжений обладает пространственной характеристикой. При этом, для подвода нужного количества энергии к «слабому звену» – дефекту, *необходимо время, достаточное для накопления* на его поверхностях упругой энергии от последовательности «эффективных» объемов импульсов волн. Поэтому, как и амплитуда *волны сжатия-растяжения*, уменьшающаяся в цилиндрической волне по гиперболическому закону, так и *фактор времени для процесса разрушения играют определяющую роль*. Трещина в малом

объеме льда в толще ледовой плиты может его разрушить как волнами меньшей амплитуды, но большей длительности или при последующих отражениях на границах дефектов, так и «короткой» волной *с высокой плотностью энергии*.

Логично предположить, что появление слоя разрушенного льда $L_{ср}$ происходит **вследствие высвобождения накопленной в этом слое упругой энергии до ее критического удельного значения**, то есть вследствие одного из видов разрушения в одиночном цикле и лавинообразного повторения таких циклов разной частоты и интенсивности трещинообразования – разрушения льда в зоне его прямого контакта с жесткой поверхностью. Поэтому, рассмотренной схеме развития и протекания процесса взаимодействия ЛП с МЛО, когда имеют место ярко выраженные циклы разрушения льда (Рисунки 3.2.4, в и 3.2.6, д) могут соответствовать модели послойного разрушения льда.

Процесс «непрерывного внедрения» для данного случая может быть представлен как совокупность процессов *взаимодействия ЛП с МЛО*, состоящая из всех элементов рассмотренных в этой главе ранее предлагавшихся исследователями и автором моделей.

Но критерием разрушения, как показано конкретно в данной концептуальной энергетической модели, является критическое значение

Изменение *контактного усилия во времени $F(t)$* для случая *их длительного взаимодействия* может иметь вид, приведенный на Рисунок 3.3.1, б: после начала разрушения сила контакта F имеет некоторые переколебания с периодом T_i от уровня среднего значения $F_{ср}$, слабо от него отклоняясь в пределах некоторой амплитуды a . Все эти параметры зависят от скорости взаимодействия индентора со льдом V и от прочностных параметров льда

На Рисунке. 3.2.8, а изображен момент начала реализации нового цикла разрушения льда. Энергия тела через *хаотично по площади контакта и неодновременно во времени образующиеся прямые контакты с целиком льда* в зонах высокого напряжения (Рисунок 3.3.7, б, в) с параллельным прессованием и выжиманием продуктов разрушения льда в предыдущем цикле его разрушения (1 на рисунке 3.2.8, а) передается массиву льда, создавая поле упругих напряжений и деформаций в виде уплотненного ядра (2). создавая поле упругих напряжений и деформаций в виде уплотненного ядра (2). Следующая позиция продвижения тела вниз – переход упругих напряжений зоны (2) в деформации хрупкого разрушения и начало лавинообразного процесса разрушения льда (4) под поверхностями прямых контактов по всей площади в этом слое льда – показана на рисунке. 3.2.8, с.

Продукты разрушения льда появляются как результат послойного перехода «твердого льда» в слой предразрушения (Рисунок 3.3.9), находящегося за границей (фронтом) разрушения. Далее, в результате процесса сжатия лед в зоне контакта получает новое состояние в виде *слоя мелкотрещиноватого льда*. Здесь происходит сброс нагрузки (Рисунок 3.3.8, с): либо постепенно для слабого льда, либо скачком для жесткого прочного льда.

Затем мелкие обломки кристаллов льда крошатся движущейся твердой поверхностью индентора, крошка еще более сминается и выдавливается из зоны контакта. На этом цикл разрушения слоя льда перед поверхностью опоры сооружения заканчивается и начинается новый – процесс сжатия продолжается (Рисунок 3.3.9).

Следовательно, в зависимости от прочности льда, скорости ледового поля и жесткости опоры сооружения могут наблюдаться различные режимы (механизмы) разрушения – как результата высвобождения накопленной упругой энергии в макрообъеме льда: от непрерывного «мягкого» дробления и экструзии смятой массы льда, до характерного хрупкого механизма скалывания блоков льда или чередования сколов с дроблением и экструзией продуктов разрушения льда из зоны контакта.

Таким образом, результаты анализа взаимодействия ЛП с МЛО однозначно показывают, что разрушение льда происходит послойно на определенную глубину L_{cr} в каждом цикле его нагружения (Рисунок 3.3.9), прерываемого разрушением слоя при достижении в нем критического напряженно-деформированного состояния (*глубина слоя разрушения по различным исследованиям и расчетам [23,301] может составлять $0,05 \div 0,15$ от толщины льда в зависимости от его прочности и сочетания толщины льда и размеров опоры сооружения*). Передача энергии сжатия вглубь массива льда продолжится только после того, как продукты разрушения кристаллов предыдущего слоя будут вытеснены из контактной зоны и контакт снова станет жестким, фронт разрушения продвинется вперед на глубину очередного слоя.

ВЫВОДЫ по главе 3

В материалах третьей главы показано, что в каждом конкретном случае взаимодействия ЛП и МЛО *кинетическая энергия* дрейфующего ледового поля *преобразуется как в поверхностную энергию* материальных элементов (осколки и блоки, крошка смятого льда, трещины различной природы и т.д.), так и *затрачивается на работу* в процессах появления, развития, перемещения и удаления из зоны контакта этих физических тел во времени. Учитывая это, можно констатировать, что *результат расчета срока службы ледостойкого сооружения с определенной вероятностью обеспечения его надежности* будет обусловлен, в основном, *адекватностью математического описания процесса разрушения льда на его контакте с опорой сооружения, также как и надежностью определения расчетного параметра прочности льда, его соответствия выбранной гипотезе механики разрушения льда, то есть – адекватностью применяемых средств и методов определения критерия прочности льда.*

В результате выполнения процедур системно анализа процесса взаимодействия ЛП с МЛО и методологического расположения необходимых для достижения цели задач,

решенных в этой главе, в качестве объекта диссертационного исследования в комплексе элементов системы проектируемой методологии обеспечения надежности и долговечности морского ледостойкого сооружения (МЛС) окончательно определен **механизм разрушения льда** – «процессор» системы ЛП – МЛС, центральным звеном которого является **критерий динамического разрушения льда *эффективная удельная энергия механического разрушения льда* – ϵ^*** .

Место и роль критерия эффективной предельной плотности упругой удельной энергии ϵ^* в формировании **циклического характера ледовой нагрузки** на данном этапе исследования, показаны в разработанном в этой главе **дескриптивном определении концептуальной энергетической модели** генерации циклической нагрузки от ЛП на МЛО. Анализ результатов концептуального рассмотрения процесса показал, что параметр ϵ^* , регулирующий сразу два параметра явления цикличности разрушения: предельную плотность энергии в единичном объеме льда, инициирующую его разрушение и сброс упругой энергии в объеме, а также частоту циклов нарастания-сбрасывания упругой энергии, следует рассматривать как **предмет диссертационного исследования**, что будет далее исследоваться целенаправленно и детализировано.

Поэтому, для дальнейшей разработки научно-обоснованной методологии определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки в системе «Ледовое поле - МЛО», **принимается ГИПОТЕЗА**, состоящая в том, что **критерием разрушения** морского льда, **интегрально учитывающим и описывающим все виды его разрушения** с его феноменологическими свойствами в реальном физическом состоянии и реальных условиях, в которых протекает процесс разрушения, является **эффективное значение критической плотности упругой внутренней энергии в структуре льда**, отнесенная к единице его массы – **эффективная удельная энергия механического разрушения льда** - ϵ_{scr} .

Доказательство принятой гипотезы станет основой для синтеза расчетной базовой модели, описывающей динамическое воздействие ледовой нагрузки на морское сооружение с использованием динамического критерия разрушения льда – **эффективной удельной энергии механического разрушения льда** – ϵ^* .

Глава 4 Экспериментально – теоретическое моделирование процесса циклического разрушения морского льда при динамическом внедрении в него жесткого индентора

В качестве предисловия к четвертой главе данного исследования, следуя необходимости доказательства принятой в третьей главе к разработке гипотезы, данная глава *посвящена разработке энергетического критерия прочности морского льда* для использования его в расчетах ледовой нагрузки на шельфовые сооружения, здесь показаны *методы его определения*. Каждый раздел этой главы направлен на решение конкретной задачи. Алгоритм расчета ледовой нагрузки, также как и другой и для других сооружений, воспринимающих нагрузку от внешних воздействий понятен. Сначала определяется механизм разрушения того объекта, который по проекту должен разрушаться: элемент конструкции или ее фрагмент, либо воздействующее тело на конструкцию тело – как в рассматриваемом случае. Затем, в данном случае, рассматривается напряженно-деформированное состояние массива льда в зоне у «рабочей» грани ЛП. *В зависимости от реального механизма разрушения* морского льда, воздействующего в реальных условиях на объект, необходимо или назначить *критерий прочности (критерий разрушения)* для морского льда. По изложенной логике, в отличие от «абстрактного – комплексного» механизма, который подразумевается в действующих в настоящее время нормативных методологиях и фигурировал в данной работе ранее, *следует конкретизировать «расчетный» механизм разрушения* и обосновать соответствующий ему по физической природе *критерий разрушения* для использования его в *расчетной модели ледовой нагрузки*.

Рассмотренные в третьей главе модели, в основном, являются концептуальными, но необходимыми элементами *системного моделирования комплексного явления взаимодействия* дрейфующего ЛП с опорами МЛС, которое должно рассматривать реальную ситуацию взаимодействия всего комплекса объектов и возникающих явлений. Поэтому необходимо исследовать ряд моделей различного типа, что по совокупности результатов такого моделирования позволит составить достаточно четкое консолидированное представление об изучаемом явлении разрушения льда. Результаты дадут *основания для составления единой модели*, основанной на системном подходе к его изучению. Исходя из этого, для достижения цели работы необходимо *следовать логике системного моделирования* в единой парадигме: от *deskриптивной и компьютерной информационных моделей* с полным описанием картины разрушения льда и поведения сооружения – к *имитационным моделям* процессов *протекания явлений во времени* на основе результатов их валидации³ по данным физического моделирования и по натурным измерениям.

³ Исходя из цели диссертации, ее результатом должна быть разработанная *имитационная расчетная модель* механизма разрушения льда (процессора существующей системы ЛП – МЛС), как преобразователя входных переменных в

4.1 Общая постановка и решение задачи исследования ϵ^* как энергетического критерия прочности льда

Теоретические исследования процесса разрушения льда на поверхности внедряющихся в его инденторов, выполненные в третьей главе диссертации создали предпосылки для разработки *дескриптивной феноменологической модели* контактного разрушения льда. Но для проверки теоретических предпосылок и концепций на данном этапе исследования процесса взаимодействия дрейфующего ЛП с опорами МЛО в качестве характерных и существенных с точки зрения целей проводимого исследования следует *экспериментально исследовать не только* типы трещин и их локации, механику и порядок их образования и роста, но, главное – понять и оценить роль *механизма циклического разрушения льда*. Отдельная задача – *получение численных значений удельной энергии механического разрушения льда для оценки целесообразности и возможности ее применения в расчетах ледовой нагрузки*.

В опубликованных в 2013-15 гг. статьях автора [367, 363. 365], проведен анализ всех опубликованных работ по теме исследований динамической твердости и удельной энергии разрушения льда, включая работы, выполнявшиеся методом «свободно падающих сфер» (Drop Ball Test Method, далее – DBT метод), а также с использованием различных копров, наклонных направляющих и пр. за период с 1956 г. Ударному воздействию подвергались как блоки естественного льда, так и мелкие и крупные образцы искусственного или естественного льда, использовались инденторы с радиусом кривизны активной поверхности от нескольких сантиметров до метров и с массой от десятков граммов до сотен килограммов. Эти данные приведены в работе норвежских исследователей [262]. В 2018 году автором в соавторстве с Е. Ким был полный обзор исследований по определению значений удельной энергии разрушения льда «в сопоставлении с концепцией «Р – А» (давление-площадь), принятой в качестве расчетной модели в международном стандарте расчета ледовых нагрузок на шельфовые сооружения [341].

Несмотря на, казалось бы, имеющее место внимание к теме исследований удельной энергии механического разрушения льда, реальных попыток по методике ее использования в расчетах ледовой нагрузки на морские сооружения, кроме предложений автора, не опубликовано. Это связано, прежде всего – с не разработанностью концепции – совокупности согласующихся и дополняющих друг друга ее теоретического обоснования, методов экспериментального определения и модели ее использования. Поэтому цель разработки данного раздела – согласование теоретической модели разрушения льда с

выходные, поэтому основная задача моделирования в данном случае – добиться *адекватности* (соответствия) *поведения реальной системы и поведения модели*. Это достигается ВАЛИДАЦИЕЙ (в т.ч. и промежуточных моделей), инструментами которой являются статистический анализ и проверка ГИПОТЕЗ, результатами которой подтверждаются конкретные требования к модели.

описанием этого явления удельной энергией разрушения единичного объема льда и предложения и обоснования адекватной теоретической модели и натурному процессу экспериментального метода получения значений удельной энергии механического разрушения льда.

4.1.1 Феноменологическая дескриптивная модель⁴ цикла разрушения льда на контакте грани ЛП с цилиндрической опорой МЛС

Основой для составления такой качественной информационной модели на системном уровне воспользуемся всем арсеналом результатов исследований по теме, накопленных в научном сообществе как в области ледоведения и ледотехники, так и в теории упругости, в термодинамике и в механике разрушения. Теоретические и экспериментальные исследования процесса разрушения льда на поверхности внедряющихся в его инденторов, выполненные в третьей главе диссертации создали предпосылки для разработки *дескриптивной феноменологической модели* контактного разрушения льда и *компьютерной информационной модели* исследуемого процесса, которые рассмотрены в следующих подразделах.

Математическое описание исследуемого явления для получения количественных характеристик затрат энергии на разрушение льда выполнено по аналогии с описанием процессов динамического внедрения жесткой сферы в полупространство из хрупкого материала [365] и порядком развития разрушений в полупространстве мало-пластичного материала при статическом вдавливании в его поверхность плоского штампа [244] и ряда других моделей.

Результаты анализа данных приведенных во второй главе исследований по характеру разрушения естественных и модельных ледовых плит как в горизонтальной плоскости, так и в вертикальном срезе торцевой поверхности плиты при вдавливании моделей и при прорезании опорами МЛО ледовых полей, послужили основой для феноменологического *дескриптивного определения энергетической модели генерации циклической нагрузки от ЛП на МЛО* с учетом явления контактного разрушения льда для случая внедрения цилиндра в вертикальную торцевую грань ледового поля – как теоретической модели, описанной в конце третьей главы. Выполненные в ряде работ эксперименты по вдавливанию (сбросу) инденторов с рабочей площадью сферической поверхности внедрения от 100 мм² до 3,0 м² в поверхность ледового массива или образца льда

⁴ Целью дескриптивных моделей (от лат. *descriptio* - описание) является установление законов изменения параметров модели.

[206,256,258,261,339,356,365,7,30,67,114,111] и другие, показали полное соответствие картины и параметров разрушения льда теоретическому анализу задачи, вытекающему из теории Герца (Рисунок 4.1.1). Рассмотрим этот феномен *по аналогии с задачей динамического внедрения жесткой сферы* в хрупкое полупространство на примере задачи Герца для камня, решенной в [24] и показанной в главе 3. Этот пример важен тем, что это – отправная точка для анализа всего комплекса явлений разрушения льда на контакте ЛП с опорой МЛС.

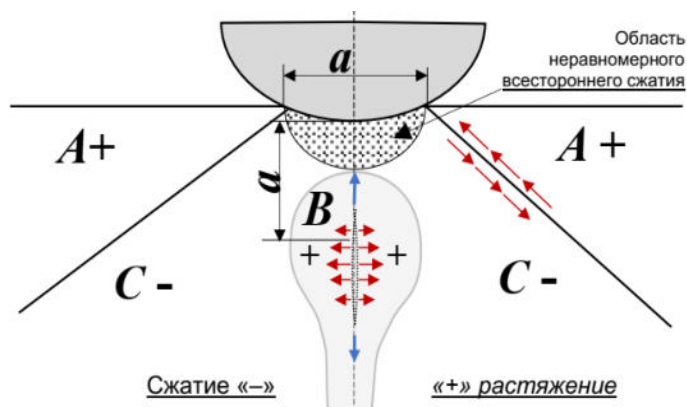


Рисунок 4.1.1 Картина напряженного состояния массива льда в зоне контакта с индентором

следует полагать, что при достижении предельного упругого состояния в ограниченной зоне контакта ЛП с МЛЮ в элементарных объемах имеющего кристаллическую структуру льда, должны проявиться видимые признаки явления хрупкого разрушения - трещины. Согласно решению Герца напряжения во всем полупространстве под поверхностью тела – индентора будут сжимающими, за исключением областей *A* (Рисунок 4.1.1) вблизи свободной поверхности льда и области *B*, расположенной под площадкой контакта на глубине 0,7–0,9 ее размера «*a*» [24]. Напряженное состояние в каждой из этих областей будет обуславливать развитие трещин и собственно разрушения. В соответствии с экспериментальными наблюдениями [7,126,30,111] схематично процесс разрушения можно представить так.

В начале контакта его площадь увеличивается с ростом силы *P* внедряющегося тела все величины можно найти из решения задачи упругого взаимодействия. Но, как только, растягивающие напряжения σ_r в области *A* достигнут прочности материала на разрыв, по контуру площадки будут поочередно появляться не глубокие параллельные образующей цилиндра трещины (для задачи контакта ЛП с МЛС), поочередно поглощаемые зоной разрушения при продвижении поверхности контакта вниз. По природе эти трещины – трещины продольного сдвига, «отрывающие» сжимаемую силой давления тела

При разработке данной модели необходимо, прежде всего, рассмотреть начальный – упругий этап нагружения полупространства льда жесткой сферической поверхностью, при этом следует иметь ввиду, что разрез по оси этой объемной картины идентичен поперечному разрезу в плоскости ледовой плиты при внедрении в него цилиндра. Поэтому рассуждения по явлениям, рассматриваемым в задаче Герца для полупространства аналогичны таковым и для плоского напряженного состояния в плите льда. Значит,

центральную часть массива под площадкой контакта от кольцевой консоли $A+$, являющейся продолжением неподвижного массива льда в ледовом поле (Рисунок 4.1.1). Края областей $A+$ под телом вблизи кругового контура контакта постоянно обламываются до верхней конусной трещины, и почти вся сила P начинает действовать на характерную площадку контакта, ограниченную сформировавшейся магистральной трещиной конической формы. Быстрый по времени и значительный по продвижению вглубь массива рост этой трещины ведет к обособлению объема сжатия в виде усеченного конуса под контактной площадкой.

Впоследствии процесс развивается так, как если бы воздействующая поверхность цилиндрической опоры давила только на фиксированную площадку контакта размером a . Кроме того, здесь следует учесть, что приращение длины конической трещины вглубь полупространства на этом этапе резко уменьшается из-за быстро растущего вниз объема внутри раскрывающегося конуса. Дальнейшее увеличение силы давления сферы вызовет быстрый рост осевых *трещин нормального отрыва* в области растягивающих напряжений $B+$ и в области растягивающих напряжений $A+$ при *изгибе круговой консоли* [49, 24], образующихся за счет последовательного воздействия вертикальной составляющей давления от части силы P , приходящейся на обламывающуюся кромку области $A+$ (Рисунок 2). Горизонтальная составляющая этого давления на кромку области $A+$ вызывает ее скол от тела в стороны, т.е. – к свободной поверхности полупространства, поэтому площадь контакта с кромкой области $A+$ нарушается и на центральной площадке давление увеличивается.

В таких условиях контактного разрушения максимальные сжимающие напряжения перед поверхностью цилиндрической опоры сооружения иногда на порядок могут превышать характерную прочность льда на одноосное сжатие [230, 24, 49, 112, 114, 116, 119]. Чем больше уровень сжимающих нагрузок, создаваемых внедряющейся опорой, тем больше число начальных трещин развиваются дополнительно. Таким образом, материал в зоне, непосредственно прилегающей к площадке контакта, дробится множеством различно направленных трещин, в результате чего заключенные между ними отдельные «кубики» в свою очередь дробятся ("сминаются"), крошка льда выдавливается из центра контакта на свободную поверхность и ЛПП продвигается вперед, зажимая на контакте с опорой МЛС прослойку из сильно уплотненной смерзшейся крошки (Рисунок 4.5.7-г), прочность на сжатие в ней может превышать 100 кГ/см^2 [123]. На этом *первый цикл разрушения слоя льда перед внедряющейся поверхностью цилиндра заканчивается*.

Результат разработки теоретической феноменологической модели локального разрушения ледового поля на контакте с опорой, как отмечено в [368, 140, 139] характеризуется, в основном, процессами трещинообразования и дробления-смятия-экструзии. При этом, как было здесь показано, процессы дробления массива и верхних частей блоков льда

между радиальными трещинами, смятия осколков льда в крошку, выдавливание всех продуктов разрушения на периферию и т.д. происходит в соответствии с эмпирическим законом Герстнера одновременно на всем временном отрезке контакта [230]. Таким образом, в приложении к процессам разрушения льда перед цилиндрической опорой МЛЮ, внедряющейся в ЛП, картина разрушений должна будет характеризоваться следующими зонами (Рисунок 3.4.6): зоной больших радиальных трещин, зоной сплошной трещиноватости и зоной сплошного смятия и экструзии крошки льда из зоны контакта. Эти теоретические проработки должны быть валидированы данными экспериментальных исследований.

4.1.2 Теоретическое обоснование адекватности применения метода DBT

Материалы исследований, рассмотренные в данном разделе диссертации автором подробно разрабатывались ранее,. Подробное описание подготовки, методов и результатов физического моделирования, выполненного в рамках данного исследовательского проекта опубликованы в работах [130,369,367,368,117,139]. Здесь в единой парадигме представлено обобщение основных результатов физического моделирования внедрения сферического индентора в поверхность полупространства из морского льда и внедрения модели цилиндрической опоры сооружения в торцевую грань ледового поля, направленное на достижение цели диссертационного исследования, в частности решения задачи разработки экспериментального метода определения критерия динамической прочности льда.

Очевидно, что для того, чтобы доказать, что **предложенная автором гипотеза о динамическом энергетическом критерии циклического разрушения льда ϵ_{cr}** , учитывающем полный комплекс процессов его разрушения в зоне контакта поверхности твердого тела со льдом, необходимо провести некоторое количество опытов по экспериментальному определению этого критерия и выполнить поверочные расчеты с его использованием в математической имитационной модели ледовой нагрузки на МЛС.

Необходимо учитывать, что будущая математическая имитационная модель⁵, которая будет синтезирована для описания процесса взаимодействия ЛП с МЛС с помощью нового критерия разрушения льда, должна соответствовать реальным процессам взаимодействия ЛП с МЛС, адекватная методология определения характеристик которого (P_{max} и f_{cicl}) является целью настоящего исследования. Следовательно, такая **модель должна**

⁵ Здесь имитационное моделирование – расчеты на ЭВМ по алгоритму заложенному в модель с введением исходных параметров для расчета с возможностью их варьирования с целью приближения результатов расчета к данным реального процесса, для которого разработана модель

будет верифицироваться, т.е., результаты, получаемые при использовании такой модели, например, частота следования пиков ледовой нагрузки (цикличность разрушения льда) должны соответствовать значениям аналогичной характеристики реального процесса. На этапе разработки дескриптивных моделей уместна валидация качественных результатов физического эксперимента с концептуально принятыми в моделях характеристиками основных процессов и их результатов таких моделей с целью установления их адекватности.

С позиций термодинамики важнейшим условием для проведения таких экспериментов по определению удельной энергии разрушения *материала* являются «... тщательные экспериментальные исследования энергетического баланса *твердого тела из конкретных материалов* в процессе его деформирования и разрушения, в различных температурно-временных условиях...» [109]. Поэтому, постановка экспериментов должна быть направлена на вычисление удельной энергии механического разрушения льда из рассмотрения уравнения энергетического баланса *при условии возможности контроля значений всех величин*, входящих в это уравнение.

Таким образом, в применении к проблеме определения удельной энергии механического разрушения льда ϵ_{cr} методом *Drop Ball Test*, по аналогии с подходом Гриффитса к определению величины γ , необходимо использовать второй закон Ньютона [130,369], как единственное справедливое применение этого экспериментального закона, потому что в данном случае он *определяет силу торможения* (замедления движения) тела, вступающего в контакт с преградой. В момент остановки тела сила реакции преграды (сопротивление льда) достигает максимального значения, - $F_{max} = m \cdot (dv/dt)$, поскольку при остановке тела *ускорение торможения* будет максимальным $-(dv/dt) = |max|$. Этот закон можно записать в энергетическом виде, умножив приведенное выше уравнение для силы сопротивления льда на перемещение тела dx . Учитывая, что $a = - (dv/dt)$ и $v = dx/dt$ получим:

(4.1)

и это означает, что изменение кинетической энергии индентора при его внедрении на глубину каверны h от начального значения до нуля равно полной работе силы, разрушающей объем льда $W_{cr}(h)$ в этой каверне [130]. Для решения задачи экспериментальной проверки рассмотренных выше концепций теорий деформирования и разрушения льда уравнение энергетического баланса (4.1) в применении к условиям натурального эксперимента можно записать в следующем виде:

(4.2)

где: W_{cr} – объем разрушенного льда в каверне разрушения; ρ – плотность льда.

Из приведенного уравнения энергетического баланса экспериментальным путем можно определять численные значения удельной энергии механического разрушения льда ϵ_{cr} , фиксируя в каждом эксперименте значения всех входящих в уравнение величин [130]:

где: H – высота свободного падения индентора массой m ; g – ускорение свободного падения.

4.1.3 Необходимые *требований* к результатам опытов для верификации модели

К стандартным требованиям, предъявляемым к результатам экспериментов, которые могут подтвердить соответствие величины ϵ_{cr} эмпирическим критериям научного знания были отнесены такие критерии как: *надежность, воспроизводимость и инвариантность*. Здесь критерий воспроизводимости рассматривается как устойчивая повторяемость результата эксперимента, выполняющегося в идентичных условиях. Надежность, как воспроизводимость результатов экспериментов, повторяемых в различных условиях, для метода экспериментального определения величины ϵ_{cr} очень важна, так как эксперименты могут проводиться в разных морях при различных условиях. Проверку воспроизводимости и надежности метода можно сделать путем выполнения большого числа экспериментов как в идентичных условиях, так и в различных.

На Рисунке 4.1.2 показана блок-схема исследований критерия ϵ^* на его соответствие основным *логическим, эмпирическим*, а также *системно–логическим* требованиям, предъявляемым к критериям, описывающим процессы методами механики сплошной среды.



Рисунок 4.1.2 Блок-схема исследования некоторых критериев соответствия экспериментальных значений величины ϵ^* её теоретическому описанию в математической модели разрушения льда

Как следует из блок-схемы исследования на Рисунке 4.1.2, наиболее важными экспериментальными параметрами, которые определяют адекватность результатов экспериментального определения величины ϵ^* являются параметры эффективного объема разрушения льда W_{cr} , а также эффективной энергии индентора U_{cr} , затрачиваемой на разрушение льда. Для правильного выбора методов определения указанных параметров

необходимо изучить как механизм образования каверны разрушения льда под поверхностью индентора, так и *систему распределения кинетической энергии индентора*.

Следовательно, как к методу экспериментального исследования, так и к методу расчета количественных значений величины ε^* , не получаемого прямыми измерениями, должны предъявляться технические и методологические требования, которые для получения корректных значений исследуемой величины должны быть соблюдены.

Во-первых, все эксперименты должны быть проведены по единой методике. В данном исследовании в качестве методики экспериментального определения удельной энергии механического разрушения льда применяется самый доступный и апробированный метод индентирования поверхности ледового покрова «падающими сферами» (метод *Drop Ball Test -DBT*).

Во – вторых, необходимо убедиться в *адекватности (достаточности) метода DBT* механизму разрушения льда [130, 369], который принят в *концептуальной дескриптивной модели*, которая, *только при ее положительной валидности* будет трансформирована в математическую имитационную модель, по которой и будет производиться расчет ледовой нагрузки на сооружение.

Данное требование здесь рассматривается как *требование соответствия и полноты исследуемых процессов разрушения* – как охват этой характеристикой всего комплекса видов разрушений в том масштабе этого явления, в котором он будет использоваться для последующего математического описания формулы расчета ледовой нагрузки на сооружение.

В-третьих, необходимо количественно исследовать влияние на выход изучаемой величины всех физических факторы, которые могут оказать влияние на численное значение величины ε^* . Другими словами – надо *провести полнофакторный эксперимент*.

В-четвертых, необходимо исследовать *валидность* данного теста. Здесь *валидность* нужно рассматривать как *надежность получаемых с помощью такого метода результатов* – это характеристика теста, отражающая его способность получать результаты, соответствующие поставленной цели измерений значений исследуемого критерия и обосновывающие адекватность этого критерия основной задаче.

4.2 Проведение полнофакторного физического эксперимента для валидации дескриптивных моделей контактного разрушения льда и определения значений удельной энергии его разрушения

4.2.1 Методика, оборудование, расчеты критерия по измеренным параметрам

Выбранный метод исследований даёт возможность комплексно оценить распределение *локально приложенной ко льду энергии* с учетом всех её затрат *на все виды и типы разрушения льда в массиве*. Эксперименты проведены с помощью легкого передвижного копра с лебедкой, набора стальных инденторов – полусферических обработанных отливок массой 67, 103, 163, 300 кг и радиусами 38,0 и 56,5 см. При производстве опытов инденторы сбрасывались с фиксированных высот от 0,1 до 2,5 метров (Рисунок 4.2.1). Они были оснащались специально разработанным датчиком перегрузок – акселерометром [118], позволявшим вести регистрацию аналогового сигнала на фотоленту в кассете светолучевого осциллографа типа Н700. для записи процесса удара на светолучевой осциллограф.

Объем отпечатка (лунки) рассчитывался по диаметру отпечатка D_0 во льду (Рисунок.4.2.1). Для ряда серий опытов в «линейке» высот сброса грузов одной массы а также в «линейке» всех масс инденторов, сбрасываемых с одной высоты производилась запись импульсов перегрузок на фотоленту. Интегрирование акселерограмм по времени удара (0,01 с) позволяло получать расчетное контактное давление и глубину отпечатка каверны разрушения, которая сравнивалась с измеренной глубиной h_0 для верификации метода.

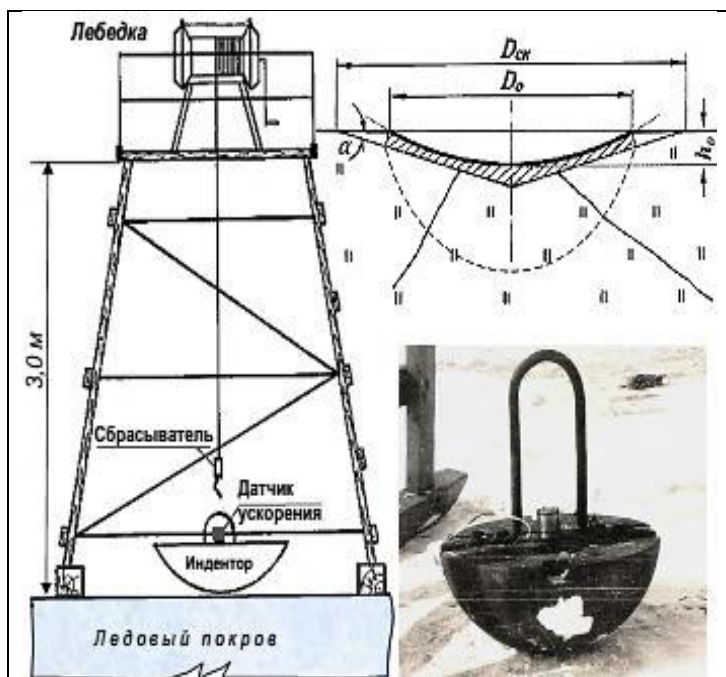


Рисунок 4.2.1 Вертикальный копер с лебедкой и электро- сбрасывателем для индентора – стальной полусферы с датчиком ускорения для получения каверны разрушения льда

Основным параметром, определяющим характеристику ϵ_{cr} , является численное значение энергии, поглощенной льдом при образовании некоторого объема разрушения льда, трещин в его массиве, сдвигов или преодоления сил трения (например, по поверхности опоры) и т.д.

В качестве исходной энергии, затрачиваемой на разрушение льда, принималась кинетическая энергия индентора, который в свободном падении с фиксированной высоты ударяет по поверхности ледяного покрова. Кинетическая энергия падающего тела определяется формулой (4.2). удельной энергии рассчитывается по формуле (4.3).

Объем отпечатка сферы (лунки) во льду рассчитывался по двум параметрам. Один из них измерялся после того, как сфера «поднималась» из этого отпечатка. Измеряемыми

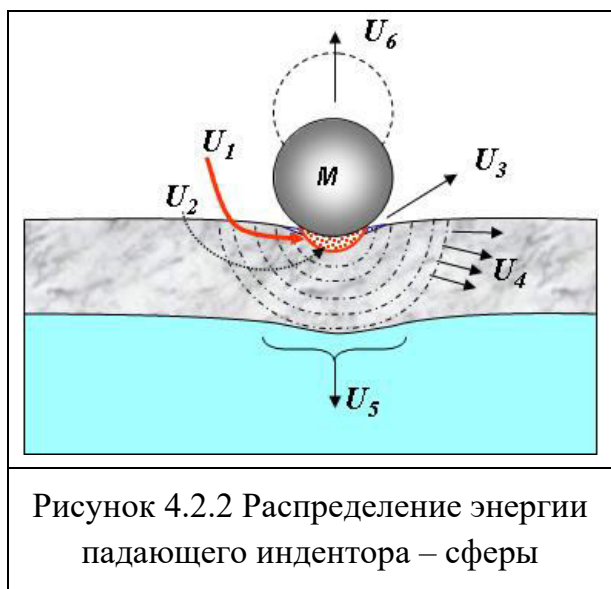
величинами являются диаметр отпечатка D_0 и его глубина h_0 (Рисунок 4.1.2). Объем отпечатка вычислялся по формуле:

(4.4)

4.2.2 Определение эффективных затрат энергии на разрушения льда

Результаты исследований различными авторами величины ϵ_{cr} имеют больше разбросы, так как были выполнены в различных условиях и различными инструментами и приборами. Поэтому главной задачей настоящего исследования было определение параметров стабильности характеристики ϵ_{cr} и определение потерь энергии на "побочные" явления, сопутствующие процессу разрушения льда в месте удара шара по его поверхности.

Было рассмотрено, куда при ударе жесткого тела по поверхности ледяного покрова расходуется кинетическая энергия U . Она распределяется так (Рисунок 4.2.2):



U_1 - на развитие процессов разрушения льда в массиве льда и на смятие слоя осколков льда в месте контакта (отпечаток);

U_2 - на повышение температуры и плавление ледяной крошки под поверхностью сферы;

U_3 - на разлет осколков льда, образующихся по периметру каверны разрушения;

U_4 - на возбуждение упругих волн в массиве льда и воде;

U_5 - на изгиб ледяного покрова;

U_6 - на восстановление скорости обратного движения тела (за счет упруго-запасенной энергии в массиве льда).

Каждая из частей энергии тела, составляющих его полную кинетической энергию имеет конкретное значение для определенных условий соударения, таких, например, как толщина льда, его температура и т.д. Исходя из рассмотренных соображений, «эффективная энергия» падающего тела, затрачиваемая на разрушение льда, определится формулой:

$$U_1 = U - U_2 - U_3 - U_4 - U_5 - U_6, \quad (4.5)$$

Но некоторые из этих частей энергии являются преобладающими по размеру её поглощения, а другими можно пренебречь в силу их малости. Можно, например, пренебречь затратам энергии U_2 , так как лед существует в природе при температурах, мало отличающихся от температуры его плавления - во-первых. Во-вторых, как показывают эксперименты, плавится только тонкий слой льда в виде пленки. Это объясняется очень низкой его теплопроводностью.

Значение энергии U_3 , *расходуемой на разлет осколков*, представляется возможным грубо определить с помощью равенства количества их движения импульсу сообщаемого им усилия: , где: - количество движения массы осколков; P - суммарное усилие,

сообщаемое осколкам за время .

На Рисунке 4.2.3 видно, что в качестве максимального объема осколков может быть объем САВ, большая часть объема разрушения льда будет раздроблена непрерывно внедряющимся телом и выжата в стороны из каверны разрушения. Эксперименты по внедрению инденторов различной формы в массивы разных горных пород показывают, что при внедрении инструмента «угол скола породы φ остается постоянным или изменяется в ограниченных пределах (примерно от 22° до 35°) независимо от крепости пород, параметров внедряемого инструмента и размеров зон разрушения». Для здесь случая рассматриваемого случая внедрения полусферы в ледовый покров в работе автора [136] этот угол был определен и он составил 25 градусов, это дало возможность определить количественную разницу между значениями удельной энергии механического дробления льда, определенными по объему отпечатка и истинному объему разрушения с учетом объема сколовшегося льда. На Рисунке 4.1.6. показаны объемы скалываемых участков льда, при этом оказалось, что данного примера они остались не «сколовшимися, то есть для реализации трещин скола энергии полусферы оказалось недостаточно для завершения очередного цикла разрушения льда. В работе автора [369] выполнен детальный расчет этой части энергии падающего тела U_3 и показано, что она составляет менее 0,5 % от всей энергии падающего ударника.

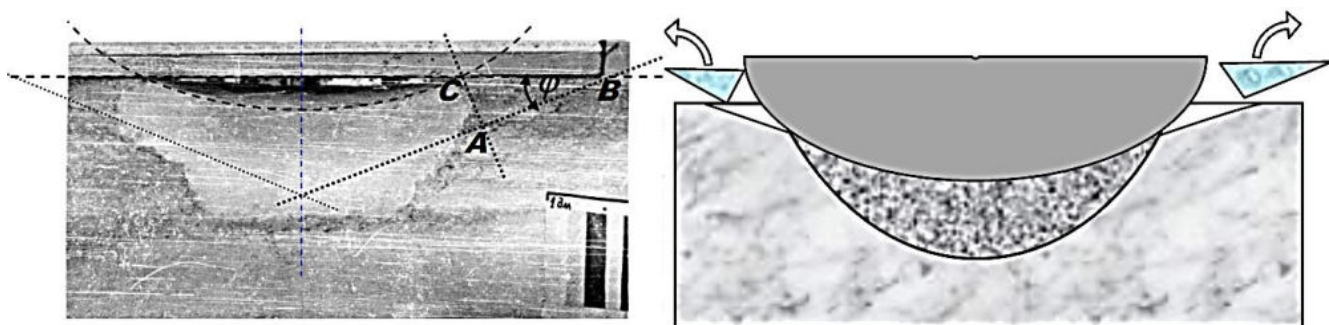


Рисунок 4.2.3 Вид зоны разрушений льда в массиве под поверхностью сферического индентора. Слева и справа видны трещины, по которым должны были бы произойти сколы льда к свободной поверхности

В той же в работе автора [369] выполнен расчет части энергии ударника U_4 , затрачиваемой на возбуждение изгибных волн в плавающей ледовой плите, которая составляет 1/25000 от исходного значения

Если для испытание применять сферы, имеющие массу меньшую, чем определенную по графику для данных значений h и E , то потерями энергий U_5 можно пренебречь, так как ледяная плита изгибаться не будет. Теоретические расчеты, проведенные с учетом упругой реакции воды, были проверены экспериментально. *Для этого в натурных условиях проводились измерения прогибов ледового покрова с помощью сейсмоприемников и прогибомеров, связанных с дном водоёма. При этом изменялись масса груза, толщина*

льда и его температура. В результате были получены зависимости в виде графиков (Рисунок 4.2.4-а), Которые помогают выполнять эксперимент при потерях, на изгиб ледового покрова, которые лежат в пределах погрешностей измерения основных контролируемых величин, являющихся факторами эксперимента.

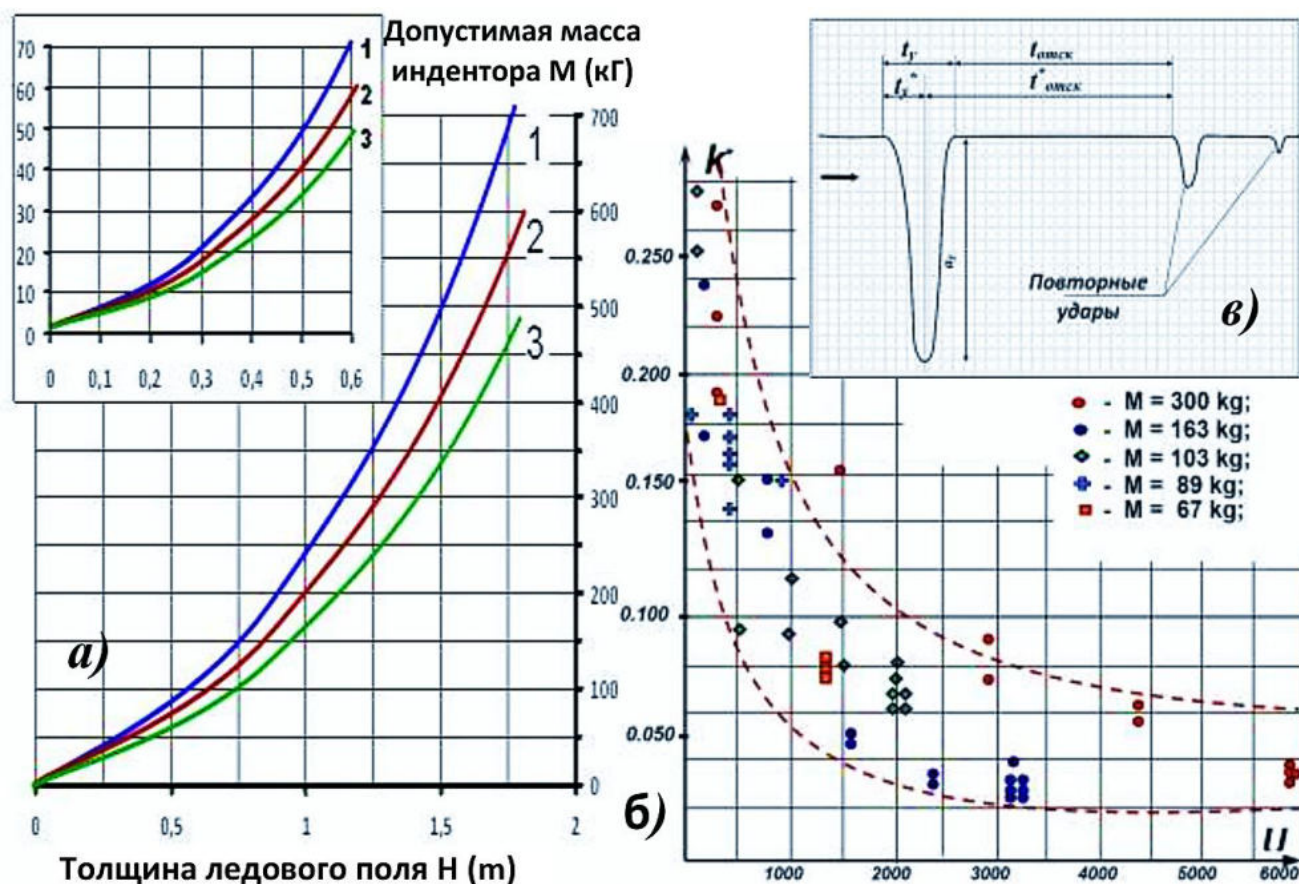
Часть энергии U_6 можно также не учитывать в расчетах величины $\mathcal{E}_{cr}$, как потерянную. Это делалось в экспериментах путем введения понятия «коэффициент потерь энергии» на восстановление энергии ударника (на «отскок» ударяющего тела). В этом случае энергия восстановления удара тела определяется по формуле:

$$(4.6)$$

где k - коэффициент восстановления энергии удара (Рис. 31); V_0 и V_1 – соответственно скорости тела до удара и скорость отскока тела. Значение коэффициента k определялось по записи показаний акселерометра, установленного на падающей сфере (Рисунок 4.2.4 - в). Часть энергии U_6 , таким образом, вычиталась из энергии индентора U .

Рисунок 4.2.4 Диаграмма выбора массы сферического индентора (а; опытные данные по коэффициентам восстановления энергии удара (б) и осциллограмма записи ускорения индентора в момент удара (в))

Учитывая результаты проведенных исследований по распределению энергии уда-



ряющего индентора, выражение (4.5), с погрешностью определения размера «эффективной энергии» в пределах 5% можно записать в виде:

$$U_1 = U - U_6 = U - U(1 - k) = k \cdot U \quad (4.7)$$

Результаты специальных расчетов показали, что более от 94 до 96% энергии внедряющейся сферы затрачивается на процессы разрушения льда, что находится в пределах допустимых погрешностей по итоговым расчетам значений ϵ^* .

Результаты исследований, направленных на теоретическое и экспериментальное изучение механизма образования каверны разрушения льда под поверхностью индентора с учетом многоциклового разрушения льда в течение одного акта внедрения приведены в работах автора Tsuprik V.G., [366,369].

4.2.3 Планирование и проведение полнофакторного эксперимента

Для доказательства инвариантности исследуемой величины ϵ^* к условиям эксперимента был выполнен полнофакторный эксперимент по заранее разработанному плану. Применение современных статистических методов планирования экспериментов в значительной мере упростило задачу определения стабильности величины ϵ^* [129].

В данном исследовании заранее принимались не значимыми такие факторы, как соленость льда (коррелирующая с его температурой) и радиус кривизны сферы. При изменении радиуса кривизны сферы картина разрушения, согласно положениям предлагаемого механизма разрушения льда, не изменится. Исходя из соотношения (4.3), по которому рассчитывается удельная энергия, основными **независимыми факторами**, оказывающими влияние на ее численное значение, являются только масса тела M и его скорость V , развиваемая им к моменту начала внедрения его поверхности в ледовый покров, они были приняты в качестве варьируемых факторов. Третьим варьируемым фактором являлся параметр «температура льда», определяющая его физическое состояние. В соответствии с планом полнофакторного эксперимента, математически задача в отношении исследуемого параметра формулировалась, так:

$$\eta = \varphi(x_1, x_2, x_3) \quad (4.8)$$

где η – изучаемый параметр; x_1, x_2, x_3 – изучаемые факторы: масса тела M , скорость тела V и температура льда T °С соответственно (Таблица 4.1). Границы варьирования изучаемых факторов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Границы варьирования изучаемых факторов

Фактор	Един. изм.	Уровни варьирования	
		+ 1	-1
Масса тела, (М) - x_1	Кг	300	163

Скорость тела (V) - x_2	м/с	4,43	2,0
Температура льда (T) - x_3	$^{\circ}\text{C}$	-10	-2

В первом приближении предполагалось, что неизвестная искомая функция η может быть описана степенным рядом, не содержащим переменных во второй и выше степенях. После выполнения всех экспериментов в восьми разных сочетаниях факторов при повторении опытов не менее 5-ти для каждого сочетания. В результате статистической обработки полученных при различных комбинациях уровней факторов значений величины η были определены коэффициенты регрессии b_i в уравнении

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (4.9)$$

где b_0 – свободный член, равный значению y при $x_i = 0$; b_i – коэффициенты регрессии соответствующих факторов, указывающие на влияние того или иного фактора на процесс.

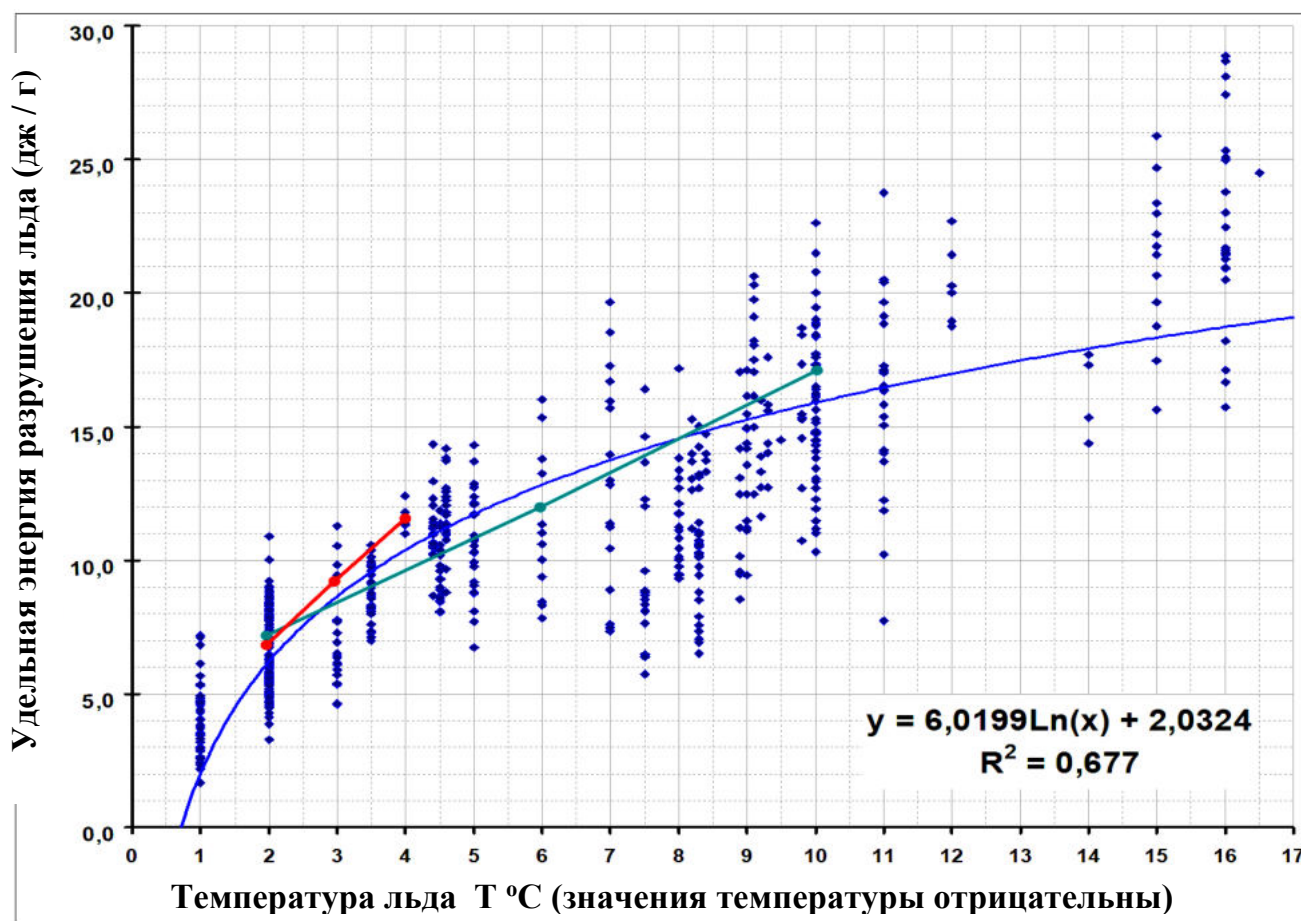


Рисунок 4.2.5 Зеленая и красная линии – графическая интерпретация результатов полнофакторного экспериментов №1 и №2: формулы (4.11) и (4.11*) соответственно

На участке планирования (Таблица 4.1) уравнение регрессии для основного

варианта эксперимента имеет вид

$$H_b = 12.02 + 0.62\Delta M + 1.22\Delta V - 5.06\Delta T + 0.51\Delta M\Delta V - 0.97\Delta V\Delta T + 0.809\Delta M\Delta T + 0.225\Delta M\Delta V\Delta T \quad (4.10)$$

С достоверностью 95 % все слагаемые, кроме первого и четвертого, оказались незначимыми, и уравнение (10) преобразовалось к виду:

$$\varepsilon_{cr}^* = 12,0_{(-6^\circ C)} \pm 5,1_{\pm(-4^\circ C)} , \quad (4.11)$$

Аналогично для проверочного эксперимента было получено уравнение

$$\varepsilon_{cr}^* = 9,2_{(-3^\circ C)} \pm 2,5_{\pm(-1^\circ C)} , \quad (4.11^*)$$

Таким образом, полученные количественные данные позволяют сделать однозначный вывод о независимости величины ε^* от условий проведения эксперимента – то есть *от массы и скорости индентора со сферической рабочей поверхностью*.

4.3 Исследования результатов экспериментов для оценки параметров способа DBT как адекватного метода определения достоверных значений эффективной удельной энергии механического разрушения льда ε^*

4.3.1 Количественный анализ полученных экспериментальных результатов

На Рисунке 4.3.1 приведена зависимость $\varepsilon_{cr} = f(T^0C)$, которая впервые была построена автором по результатам экспериментов с участием автора [130]. Для построения этой кривой были использованы результаты около 700 опытных точек. На этой диаграмме прямыми отрезками показаны результаты исследования зависимостей величины ε_{cr} от условий экспериментов (4.11 и 4.11*). Как видно из формул, описывающих эти отрезки – в них отсутствуют такие параметры как масса сферического тела M , его радиус R и скорость соударения V , потому что они оказались величинами, которые не влияют на выход величины ε_{cr} в эксперименте. Это доказывает инвариантность исследуемой величины к условиям испытаний.

Но, в то же время на графике отчетливо можно увидеть, что **разбросы значений величины ε_{cr} , определяемой при одном конкретном значении температуры имеют большой диапазон значений**. Это объясняется тем [130], что здесь мы имеем результаты определения значений величины ε^* , полученные при постоянной температуре льда, но

при различной энергии удара – энергии падающего полусферического стального груза U_{cr} . Этот факт также требовалось исследовать.

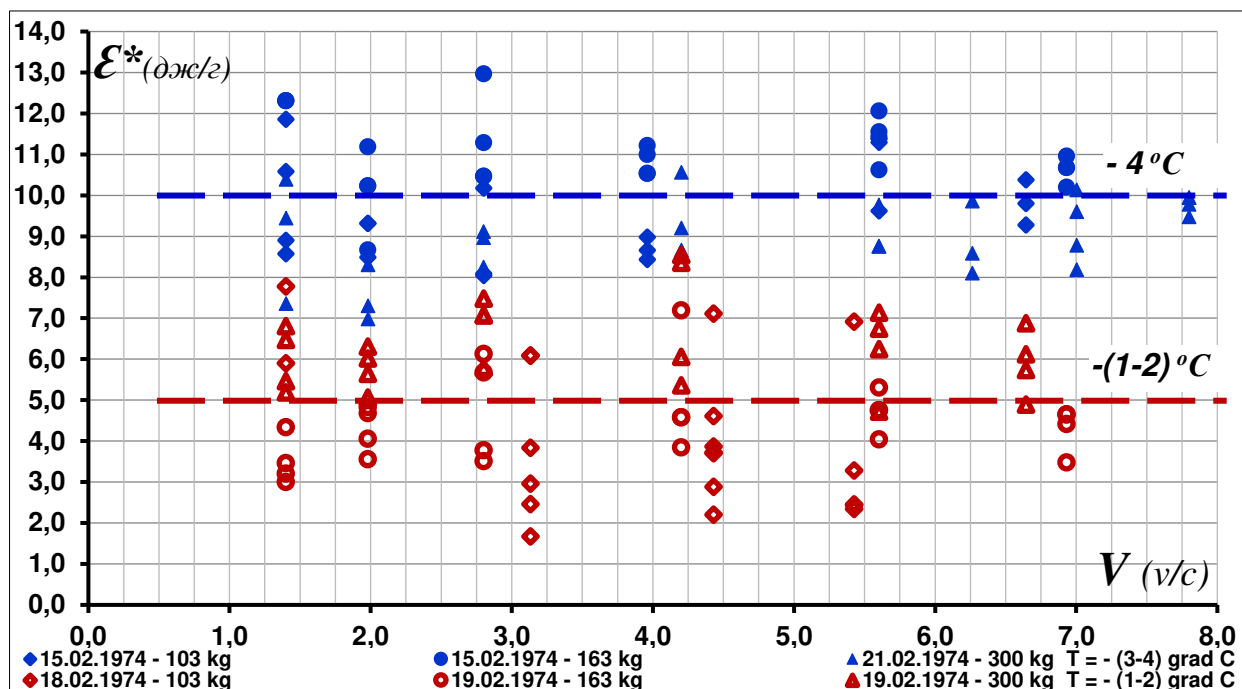


Рисунок 4.3.1 Распределение значений величины ϵ^* , полученных для различных скоростей удара индентора при температуре льда $-(1-2)^\circ\text{C}$ и при $-(3-4)^\circ\text{C}$

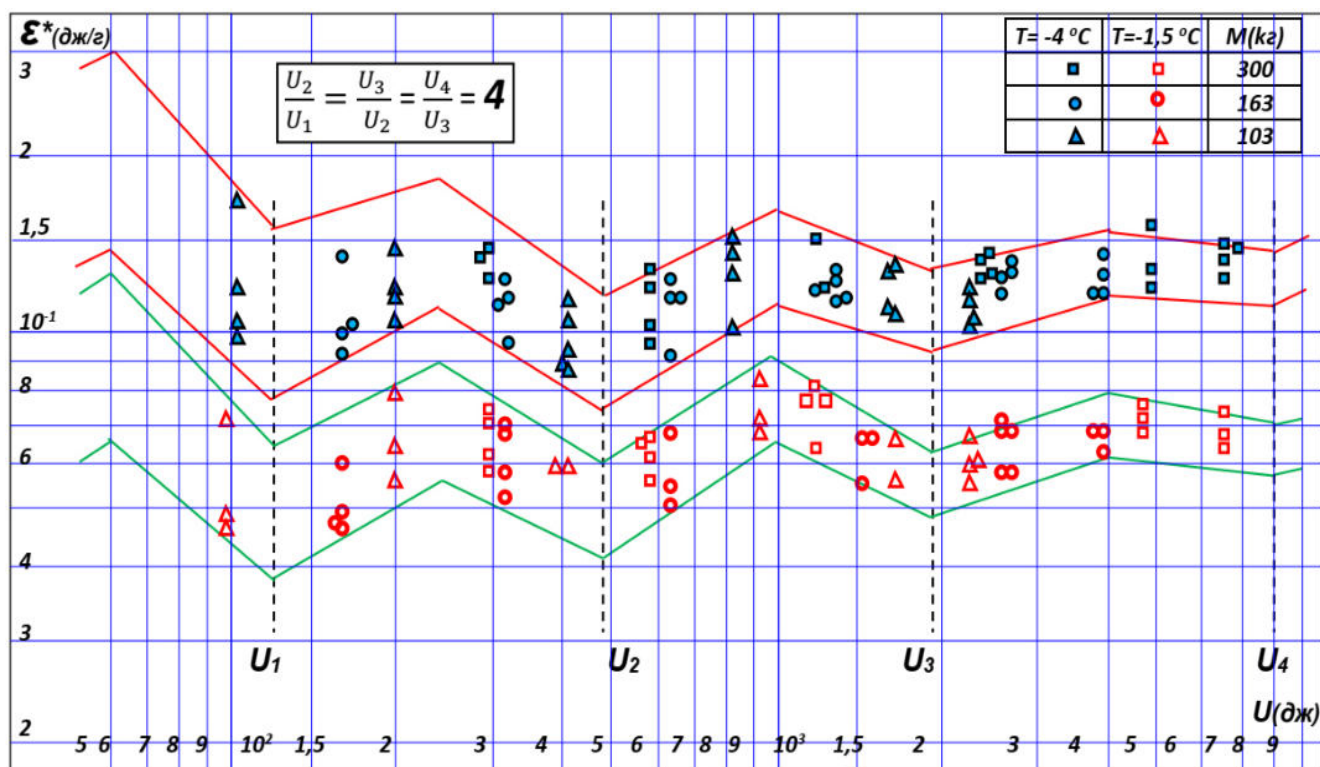


Рисунок 4.3.2 Распределение значений величины ε^* , полученных для различных энергий удара индентором по льду, имеющему разную температуру

В связи с выявленной особенностью некоторого «избирательного» разброса значений исследуемой величины на графике, приведенном на Рисунках 4.2.5 и 4.3.1, были проанализированы результаты опытов, которые проводились при одной температуре льда и при воздействии по нему ударами инденторов разной массы, но при их постоянной скорости. Оказалось [369,116,123]., что действительно, график зависимости $\varepsilon_{cr} = \varphi(U_{cr})$ при $T^\circ C = const$ имеет «волнообразный» характер. При нанесении экспериментальных точек на логарифмическую сетку координат отчетливо проявились характерные «волны» – максимумы и минимумы на этих графиках (Рисунок 1.4.10). Показанная на Рисунка 4.3.2 периодичность проявления «минимумов» и «максимумов» на графиках $\varepsilon^* = \varphi(U)$ может проявляться только в том случае, если **разрушение льда** в процессе внедрения в него твердой сферы **происходит в несколько циклов**, то есть когда индентор **в продолжении времени проникновения его в лед разрушает его «послойно»**. **Продвигаясь в глубь массива на глубину, пропорциональную** запасу кинетической энергии индентора [130,367, 123,126]. Каждый цикл разрушения – разрушение слоя льда происходит в три этапа, как описано в [123,126, 365, 131], где опубликованы модели разрушения льда под сферическим индентором и рассмотрены все детали этого процесса. Это подтверждается результатами экспериментов.

4.3.2 Анализ возможности описания параметров цикличности эффективной удельной энергией механического разрушения льда

На Рисунке 4.4.4-в изображен момент окончания рассматриваемого цикла разрушения льда, когда продукты разрушения очередного слоя льда вытеснены из зоны контакта, их остатки спрессованы под поверхностью тела. Если к этому моменту запас энергии тела исчерпан – оно остановилось и свободно опирается на массив льда, не создавая поля упругих напряжений (п.2*) под ним в массиве льда. Следовательно, **тело в этом случае не получит обратного движения** (отскока), поскольку запас упругих деформаций в массиве не был создан. Удельная энергия разрушения, вычисленная для этого случая будет иметь минимальное значение и можно утверждать, что она наиболее произвольно потрачена на разрушение льда. Такое значение величины ε_{cr} *можно принимать в расчеты как эффективное*. Данная гипотеза может быть сформулирована следующим образом: минимальное значение ε_{cr} , полученное из эксперимента, может

рассматриваться как «энергетическая константа» для контактного разрушения морского льда при данной температуре.

Если же в теле еще остался запас кинетической энергии, что заставляет его двигаться вперед, в массиве льда под телом образуется поле упругих напряжений и деформаций (п. 2*). И если запаса энергии тела не достаточно на разрушение очередного слоя льда – упругие деформации массива льда «возвратят» не рассеянную в нем энергию ударнику, который получит обратное движение вверх (отскочит). При расчете удельной энергии разрушения эту часть энергии необходимо исключить из расчета – как потраченную «неэффективно». В эксперименте на натурном ледяном покрове провести «идеальное» измерение очень трудно, для этого необходимо провести множество предварительных экспериментов, чтобы «нащупать» характерные значения энергии ударника для получения целого количества «эффективных циклов разрушения и получить численные соотношения между значениями этих энергий. Это необходимо для определения толщины слоя разрушения льда. но этого можно достичь, постоянно отслеживая изменения коэффициента восстановления энергии удара, как показано на Рисунке 4.3.3.

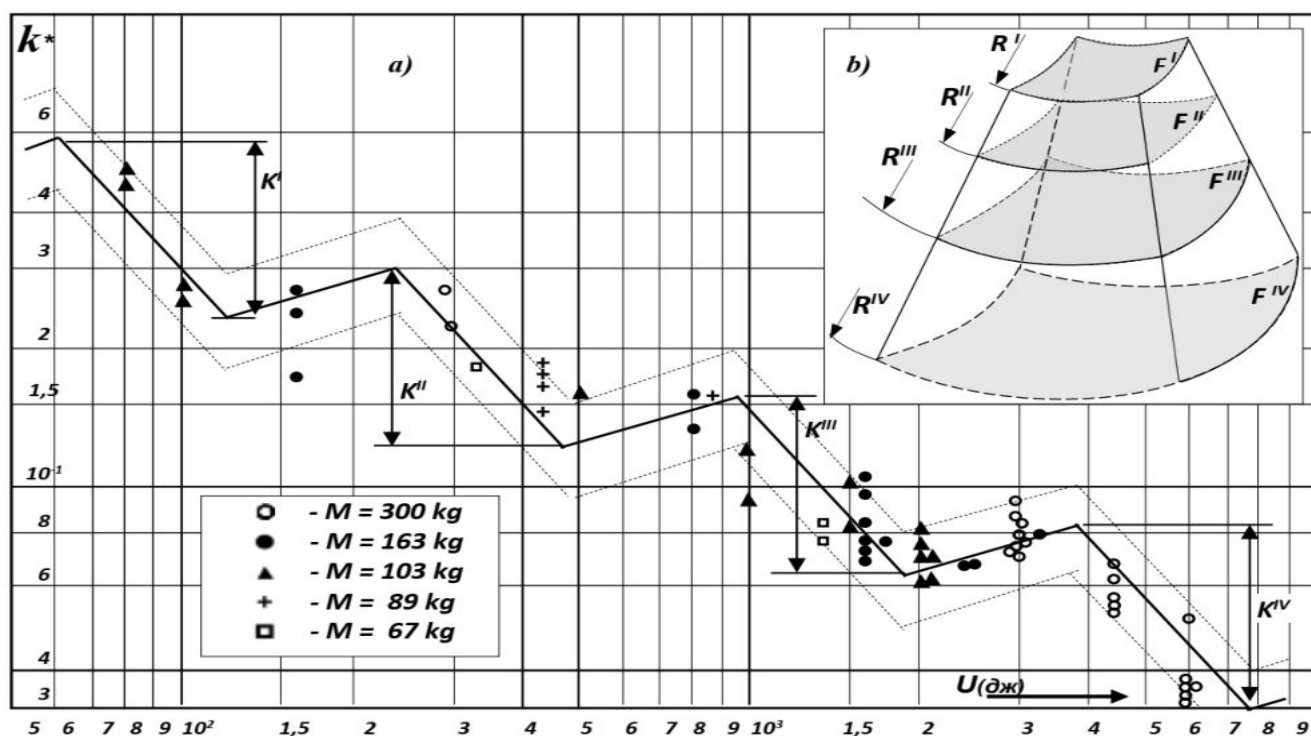


Рисунок 4.3.3 Распределение значений коэффициента восстановления энергии индентора после удара по поверхности льда в зависимости от энергии удара

В процессе выполнения опытов возможны два варианта получаемого результата; а) - энергия индентора на 100 % израсходована на ударное разрушение льда; б) любой запланированный к его реализации сброс груза с фиксированной начальной энергией удара, предполагающей «целое число» циклов разрушения, в силу различных отклонений в физико-механическом состоянии поверхностного слоя льда может привести к результату, когда «начатый

процессом разрушения льда цикл» не закончен. Индентор получает «отскок» - обратное движение за счет сообщаемой ему энергии от остатков упругого сжатия «целика» льда и плюс энергии сжатых под индентором продуктов разрушения льда, которые также, упруго разгружаясь, сообщают индентору обратное движение [367]. На Рисунке 4.3.3-б показан сферический сегмент массива льда, на который передается нагрузка от жесткой сферической поверхности индентора. Который можно рассматривать как упруго-пластический элемент, пластическая составляющая которого зависит от толщины продуктов разрушения, оставшихся под телом после «Целого числа» циклов разрушения льда.

Таким образом, периодичность проявления «минимумов» и «максимумов» на графиках $\varepsilon^* = \varphi(U)$ подтверждает, что разрушение льда в процессе внедрения в него твердой сферы происходит в несколько циклов. В зависимости от запаса энергии сферы – индентора в процессе одного удара может быть реализовано несколько циклов, разрушения - т.е. может быть разрушено несколько слоев льда. Это означает, что при одиночном ударе сферы по поверхности ледяного покрова лед разрушается циклами от одного до нескольких – в зависимости от кинетической энергии сферы и температуры льда.

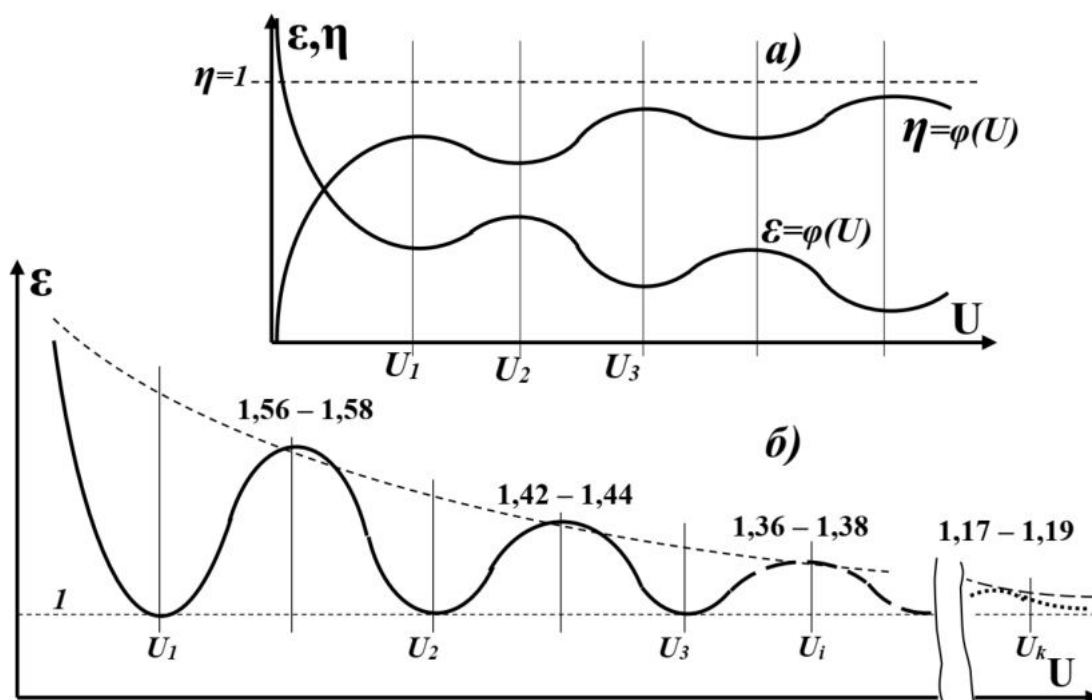


Рисунок 4.3.4 Изменение величины ε в зависимости от энергии одного удара U для соотношений $R/h_0 = 0,05 - 0,1$ по [126,367,369].

Но каждый цикл разрушения – разрушение слоя льда, которое происходит в три этапа, что экспериментально подтверждает описанную в главе 3 феноменологическую модель (гипотезу) послойного циклического разрушения льда при внедрении в него опоры сооружения и согласовывается с данными других авторов по исследованиям для камня [17].

Минимальные значения удельной энергии разрушения льда ε^* имеют место в

случае полного использования энергии внедряющегося тела (U) на **разрушение целого количества слоёв льда**. Когда полное количество циклов большое (например, на Рисунке 4.3.4-б U_k), тогда к.п.д. процесса $\dot{\eta} \rightarrow 1,0$ (Рисунок 4.3.4-а), а максимальные – когда под поверхностью индентора остаются не вытесненными из зоны контакта продукты разрушения льда. Это уменьшает глубину отпечатка и, соответственно значение его объема, и следовательно – увеличивает значение ε_{cr} , делая его **некорректным** – не соответствующим принципу необходимости и достаточности минимума упругой энергии в единице объема льда, которая вызывает его разрушение и является постоянной величиной для конкретного вида льда при его конкретной температуре.

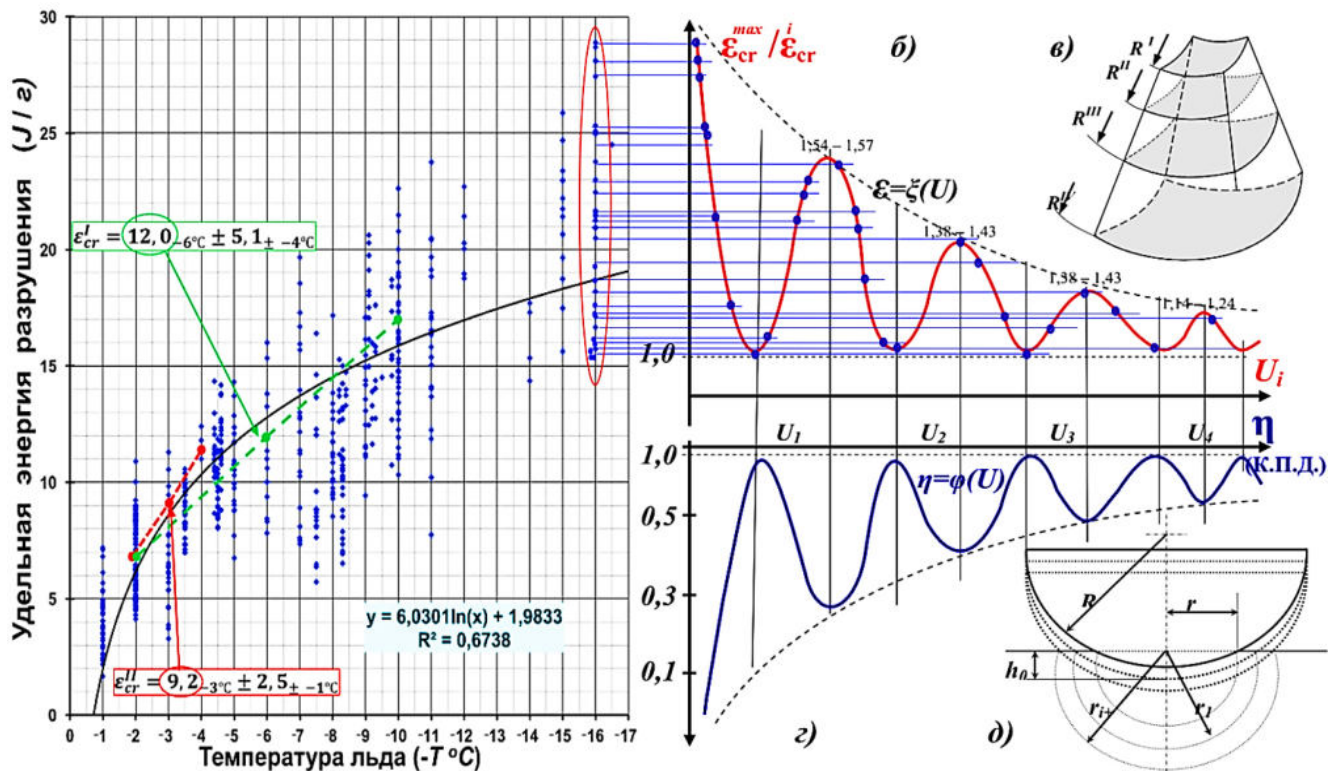


Рисунок 4.3.5 Иллюстрация образования разброса экспериментальных данных по определению удельной энергии механического разрушения морского льда ε^* КПД совершенной кинетической энергии сферы-индентора работы

Теоретические соотношения в разнице затрат энергии на разрушение объема в двух отличающихся на 1 цикл процессах внедрения сферы в массив льда показаны на графике значений удельной энергии на Рисунке 4.3.4-а: в диапазоне невысоких энергий $R_{i+1} = 1,58R_i$; а для больших энергий это соотношение снижается до 1,17 – 1,19 за счет уменьшения непроизводительных потерь энергии отнесенных к объему разрушенного льда. Именно этим объясняется соотношение между затраченными энергиями «соседних» волн затрат энергии на Рисунках 4.3.2 – 4.3.4.равное четырем.

На рисунке 4.3.5 приводится ответ на вопрос по разбросу точек – значений удельной энергии разрушения льда на графике зависимости этой величины от температуры льда

(Рисунок 4.2.5). Ответ в виде пояснения сути протекания разрушения льда в виде циклического послойного разрушения был приведен выше. Он заключается в том, что объем разрушенного льда измеряется только по объему отпечатка во льду. При этом нет возможности учесть КПД совершенной индентором работы, которую надо отнести к затраченному объему. Как можно видеть из построения связей экспериментальных точек значений удельной энергии на графике $\mathcal{E}^* = \psi(T^{\circ}\text{C})$ только те значения удельной энергии, которые получены при разрушении при полном потреблении на этот процесс энергии индентора могут считаться критерийными значениями удельной энергии, поскольку их значения соответствуют определению критерия как «минимально необходимое и достаточное количество энергии для разрушения единичного объема (массы) материала».

Это можно считать верификацией количественного результата метода определения удельной энергии разрушения льда как критерия для прочностных расчетов.

4.4 Экспериментальная валидации адекватности экспериментального метода информационной модели внедрения индентора с круговой поверхностью в поверхность льда

Изучение *картины контактного разрушения морского льда* по результатам экспериментов показало, что при внедрении жесткой сферы в поверхность ледяного покрова, лед может проявлять различные свойства в зависимости от его температуры (Рисунок 4.4.1).

В случае «теплого» льда, в зависимости от запаса кинетической энергии сферы, она внедряется в его поверхность по схеме воздействия индентора в полупространство из упруго-пластического или даже пластического материала (Рисунок 4.4.1, а). На фотографии [130] отчетливо прослеживается полусферическая зона всесторонне сжатого объема продуктов разрушения льда, представляющих собой его отдельные кристаллы и их обломки. Здесь сфера просто «входит» в массив слабосвязанных кристаллов, отделяя их друг от друга, частично ломая, сминая и уплотняя весь объем, при этом отчетливо прослеживается полусферическая зона всесторонне сжатого объема продуктов разрушения льда, представляющих собой его отдельные кристаллы и их обломки. В данном случае *явления выраженного циклического разрушения не наблюдается*.

Отчетливо видны результаты действия гидростатического давления во всесторонне сжатом объеме разрушенного льда: *продукты разрушения неравномерно «впрессовываются»* в зоны слабого льда в его массиве. При этом часть рассола, межкристаллической и расплавленной энергией сферы воды выжимается на поверхность льда по контуру контактной поверхности сферы и разбрызгивается. Безусловно, при математическом

описании процесса контактного внедрения такого вида можно применить описание вдавливания индентора в *пластическую или в упругопластическую среду*.

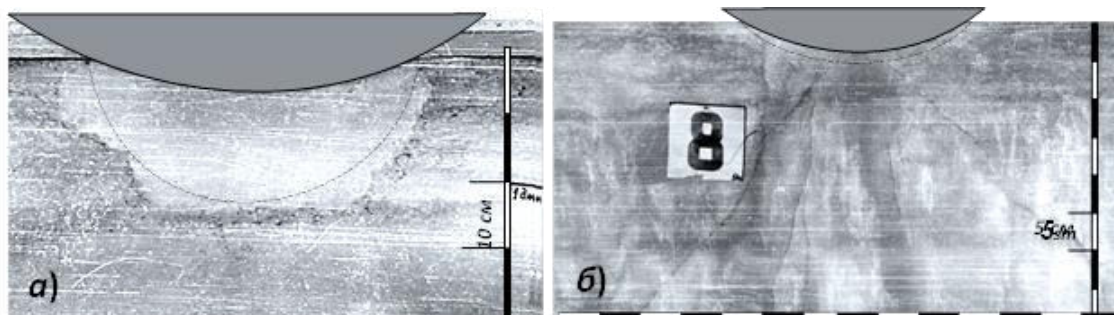


Рисунок 4.4.1 Фотографии разрезов массивов природного морского льда по оси внедрения жесткой сферы массой $M = 163$ кг и радиусом $R = 28,3$ см, сброшенных с высоты 1,2 (а) и 2,2 м (б) на поверхность морского ледяного покрова, $H = 75-80$ см при $T_{\text{льда}} = -40^{\circ}\text{C}$ (а) и -100°C (б), по [130] (1974-1978)

При температуре ниже минус 8°C и скорости внедрения сферы $V_0 > 0,5$ м/с морской лед практически всегда разрушается хрупко (Рисунок 4.4.1 -б) [130]. Поэтому, учитывая эти весьма существенные особенности свойств льда, в расчетах ледовой нагрузки на сооружение разрушения льда может описываться как по упруго-хрупкому механизму, так и по вязко-упругому.

На Рисунке 4.4.2. показаны дополнительные детали явления внедрения сферы в ледовый покров: на левой фотографии показан вид в плане на отпечаток сферы во льду после внедрения в «холодно-хрупкий» лед. Здесь поверхность льда, имеющего температуру -14°C , до удара была присыпана угольной пылью для лучшей контрастности в зоне разрушения при фотографировании результата опыта.

На этой фотографии также видны продукты контактного динамического разрушения поверхности ледяного покрова, которые частично выдавлены наружу – на периметр контактной зоны, а частично остались зажатыми под поверхностью металлической сферы, сброшенной с высоты 2,2 м [130]. В данном случае, лед разрушался по «классическому» упруго-хрупкому механизму разрушения с образованием конических кольцевых трещин в вертикальной плоскости, радиальных трещин в плане, а также сколов по периметру кратера внедрения – как показано на Рисунке 4.4.2 -б.

Правая фотография приводится для сравнения картин разрушения морского и пресного льда при внедрении сферы. Практически никаких отличий не наблюдается. Следуя методу определения удельной энергии разрушения льда путем отнесения объема потенциальной энергии ударяющего тела, затраченной на разрушение льда к массе льда в объеме образовавшегося отпечатка во льду, такой метод имеет место быть. Это дает основание *считать механизм разрушения льда*, принятый в рассмотренной в предыдущем

разделе дескриптивной информационной модели циклического внедрения сферического тела в поверхность ледового *поля адекватным механизму разрушения льда на контакте* со сферой в реальных условиях контактного взаимодействия.

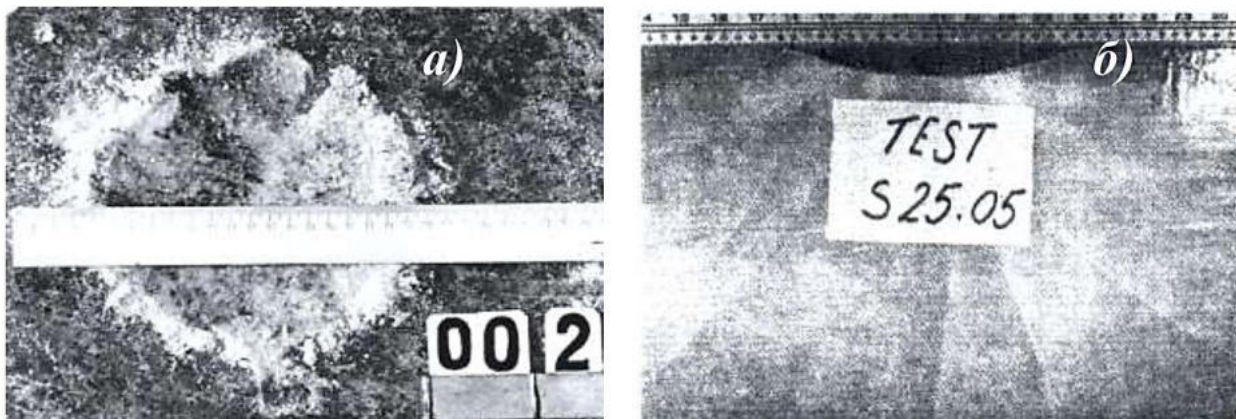


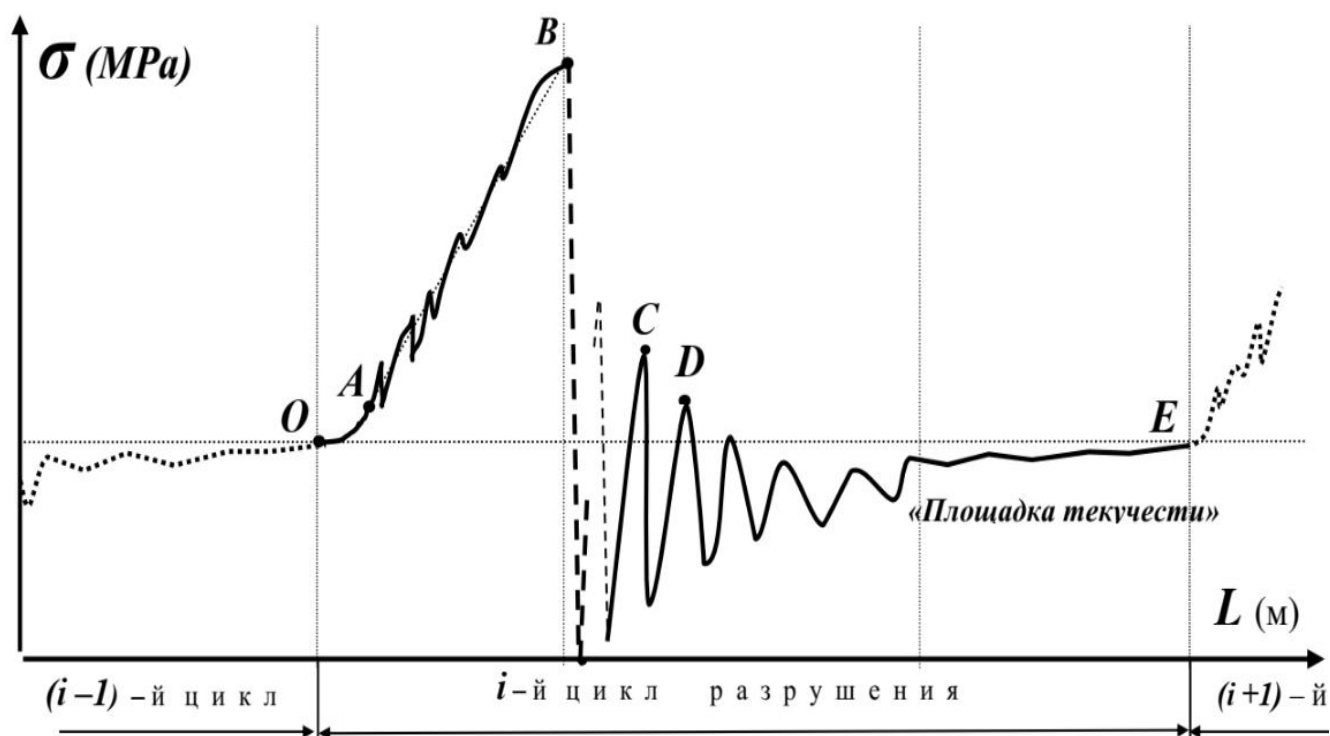
Рисунок 4.4.2 Продукты разрушения морского льда под стальной сферой массой 103 кг и диаметром 39,5 см (а), сброшенной с высоты 2,2 м и фотография шлифа цилиндрического образца льда из пресной воды в алюминиевом кольце (б) после внедрения в него шарового индентора (Gagnon & Gammon [206]).

Результаты анализа полученных материалов по выполненным экспериментальным исследованиям развития процессов разрушения в структуре льда под внедряющимся телом с криволинейной поверхностью (система трещинообразования в массиве льда, механизмы смятия дробленого льда и экструзии продуктов его разрушения на периферию контакта и пр.) **позволяют сделать однозначный вывод:** заложенный в дескриптивную информационную модель контактного разрушения льда в массиве **механизм комплексного разрушения льда подтверждается** однозначным соответствием ряда признаков модели и реальных явлений и процессов, таких как: послойное циклическое разрушение льда; процессы зарождения и развития системы основных трещин, формирование системы скалываемых элементов; дробление и смятие обломков льда под поверхностью внедряющегося тела; выжимание продуктов разрушения льда из зоны контакта на периферию.

На Рисунке 4.4.3 приведена графическая интерпретация одного полного цикла разрушения льда, а также дано описание физических явлений на каждом из трех этапов разрушения, из которых состоит каждый полный цикл разрушения льда. Здесь дана характеристик льда – как разрушаемого материала, а также приведено вербальное описание среды, которой в модели разрушения льда [123,126, 365], разработанной автором, описывается материал – продукты разрушения льда в конце каждого этапа его разрушения. на каждом этапе разрушения.

Другими словами, на Рисунке 4.4.3 представлена феноменологическая модель контактного разрушения льда, которая дает возможность разработке на ее основе математической имитационной модели взаимодействия индентора, внедряющегося в ледовый массив.

На Рисунке 4.4.4 [367] показаны отдельные фрагменты одного полного цикла процесса разрушения льда под внедряющимся в его массив ударником со сферической поверхностью, представленного на Рисунке 4.4.4 графически.

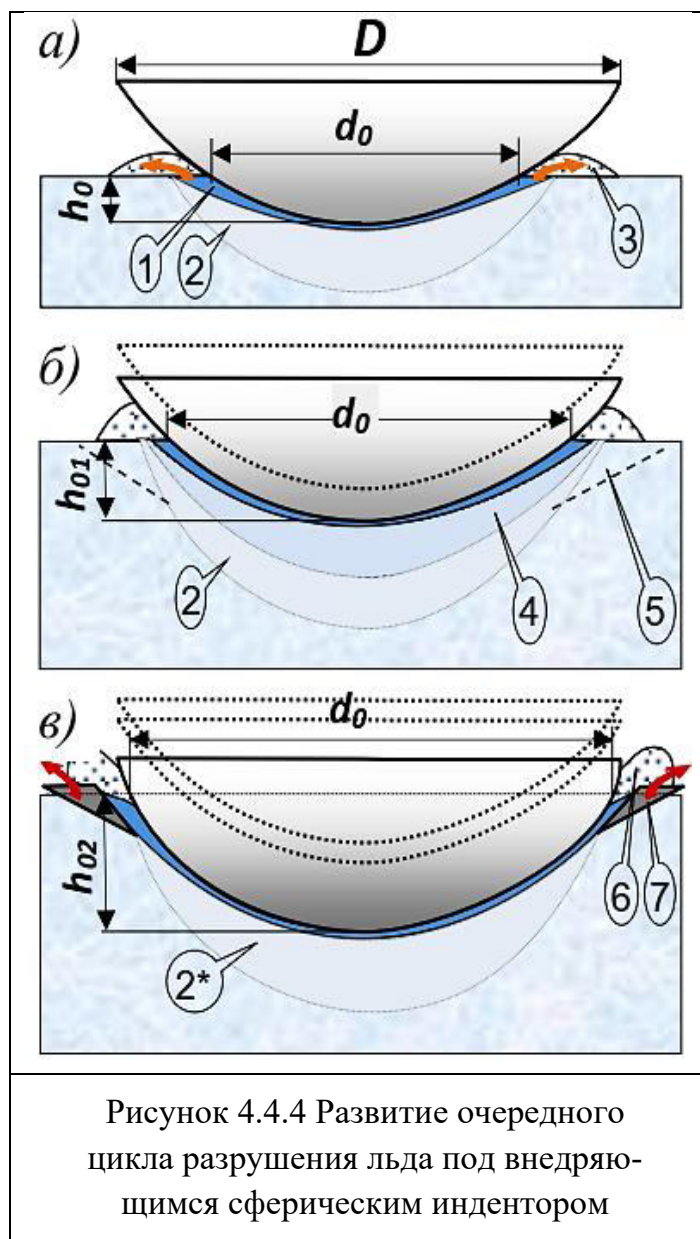


ЭТАПЫ процесса разрушения слоя льда	Этап 1	Этап 2	Этап 3
	Упругое сжатие, хрупкое растрескивание	Дробление крупных обломков блоков при контактном сжатии на мелкие осколки	Сжатие мелкодисперсной массы ледяной крошки
Описание физических явлений на данном этапе процесса	Появление сети трещин (между ними – блоки льда)	Масса отдельных блоков, кристаллов и их обломков подвергается сжатию; «Процесс упаковки»	Происходит полное уплотнение всего объёма разрушенного слоя льда
Характеристика материала среды в конце этапа	Крупно- дисперсная масса осколков блоков льда	Мелкодисперсная масса (ледяная крошка) с прослойками рассола	Твёрдое тело (жёсткая прокладка) между монолитом льда и поверхностью опоры
Аппроксимация среды в процессе сжатия	Упругое полу- пространство	Упруго-пластическое полупространство	Вязкая жидкость

Рисунок 4.4.3 Распределение значений коэффициента восстановления энергии индентора после удара по поверхности льда в зависимости от энергии удара

Здесь изображены фрагменты процесса разрушения льда под внедряющимся в его массив ударником со сферической поверхностью: 1- спрессованный слой льда, разрушенного в предыдущем цикле разрушения; 2 – зона упругих напряжений и деформаций; 3- вытесненная из зоны контакта ледяная крошка; 4 – начало лавинообразного разрушения льда в упруго сжатой зоне при накоплении энергии более ϵ_{cr} ; 5 – участки массива льда, испытывающие боковое давление со стороны сжимаемых под поверхностью тела продуктов

разрушения льда, которые выдавливаются из зоны контакта; 6 – вытесненные из зоны контакта продукты разрушения льда в этом цикле разрушения; 7- сколовшиеся «треугольные» куски льда по окружности каверны разрушения. Откололся кусок льда



На рисунке 4.4.4-а изображен момент начала реализации нового цикла разрушения льда. Энергия тела через жесткую прокладку из спрессованных продуктов разрушения льда в предыдущем цикле его разрушения (позиция 1) передается массиву льда, создавая поле упругих напряжений и деформаций в виде уплотненного ядра (п. 2). На Рисунке 4.4.4-б показана следующая позиция продвижения тела вниз, переход упругих напряжений зоны (п. 2) в деформации хрупкого разрушения и начало лавинообразного процесса разрушения льда (п. 4) в этой зоне. Окончание этого процесса совпадает с окончанием вытеснения продуктов разрушения (п. 6), которые своим боковым давлением производят выталкивание (скалывание) треугольных участков льда (п.7) по границе контакта. Математическое описание процесса сколов льда по границе контакта сферы с массивом льда подробно изложено в работе автора [18].

4.4 Доказательства гипотезы эффективной удельной плотности энергии упругой деформации льда как интегративного энергетического критерия его динамического разрушения

Принятая в диссертации **гипотеза эффективной плотности удельной энергии упругой деформации льда** как интегративного энергетического критерия его динамического разрушения основана на законе сохранения энергии, принципиально просто и однозначно объясняет развитие всех видов процессов и явлений разрушения

кристаллической структуры и сложной текстуры льда и *не противоречит* имеющимся знаниям механики деформирования и разрушения твердых тел. Истинность гипотезы *требует опытно экспериментального подтверждения* приведенных ниже *четырех ее основных следствий* с учетом особенностей морского льда.

4.4.1 Следствие 1. Процесс накопления упругих деформаций имеет волновую природу

В структурно-энергетической интерпретации процесса *упругопластического деформирования* напряженного объема льда следует исходить из предположения о существовании трансформационного энергетического процесса, в котором *кинетическая энергия* ледового поля в процессе его давления на жесткую неподвижную опору, создает *энергетический поток* волновой природы в массиве ледовой плиты, прилегающем к зоне контакта. Достаточно наглядно процесс распространения энергетического потока в виде *цилиндрической волны напряжений* в ледовой плите показан на Рисунок 7.

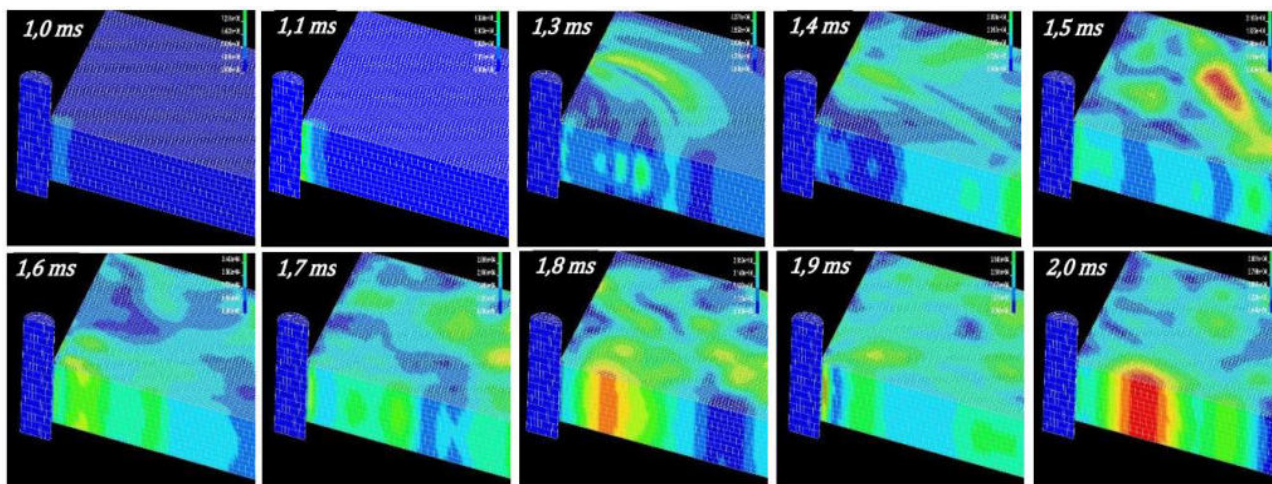


Рисунок 4.4.5 Иллюстрация распространения волны сжатия-растяжения в массиве льда в зоне контакта ЛП с сооружением, вызывающей развитие микроразрушений структуры льда

Следовательно, разрушение льда следует рассматривать с нескольких позиций: статистической физики – как многоэтапного, пространственно – временного процесса накопления и развития нарушений сплошности материала (дефектов его структуры) [44,73]; феноменологической термодинамики [109,]; волновой теории [230,78]. Эти подходы к описанию процесса разрушения, опираясь на фундаментальные законы сохранения, показывают, что внешняя сила не сама разрывает внутренние связи, а лишь *активирует процесс* их разрыва *энергетическими флуктуациями*, увеличивая вероятность таких разрывов. Исходя из этого, внешняя сила только обеспечивает *направленность*

разрывного действия флуктуаций и развитие процесса разрушения, как протекающего во времени единого процесса *накопления нарушений* в структуре льда и *накопления упругой энергии* в его объеме. Энергетические флуктуации поступают во все точки напряженного объема льда в виде потока энергии, переносимого волнами сжатия–растяжения [230,78], имеющими некоторую *объемную плотность механической энергии вовлеченных в процесс передачи импульса частиц льда*. Плотность энергии волны, согласно теории волновых процессов, пропорциональна плотности льда ρ , квадратам частоты ω и амплитуды a , зависит от координаты и является функцией времени: $w = \rho a^2 \omega^2 \sin^2(\omega t - kx + \alpha)$; ее среднее значение $w = 0,5 \rho a^2 \omega^2$ (дж/м³).

Сущность феноменологического явления зарождения трещин, а также их развития состоит в том, что на эти процессы необходимо затратить вполне определенное количество упругой энергии деформации на единичный объем льда, которая в волне напряжений обладает пространственной характеристикой. При этом, для подвода нужного количества энергии к «слабому звену» – дефекту, необходимо время, достаточное для накопления на его поверхностях упругой энергии от последовательности «эффективных» объемов импульсов волн. Поэтому, как и амплитуда волны сжатия–растяжения, уменьшающаяся в цилиндрической волне по гиперболическому закону, так и фактор времени для процесса разрушения играют определяющую роль. Трещина в малом объеме льда в толще ледовой плиты может его разрушить как волнами меньшей амплитуды, но большей длительности или при последующих отражениях на границах дефектов, так и «короткой» волной с высокой плотностью энергии.

Качественные картины распространения упругой волны сжатия в ледовой плите (Рисунок 4.4.5), полученные по результатам компьютерного эксперимента, **подтверждают** волновую природу распространения энергии в ледовой плите, а также образование микронарушений в структуре льда не только непосредственно в зоне, прилегающей к контактной поверхности, но и в зонах концентрации напряжений (зона +В на Рисунок 2) и по границам зон сжатия и зон растяжения (+А и -С на Рисунок 2), что приводит к развитию в дальнейшем по этим границам магистральных радиальных трещин в массиве ледовой плиты.

4.4.2 Следствие 2. Скорость ЛП и температура льда определяют механизм его разрушения.

А. Теоретическое обоснование. При движении ледового поля контактная сила F , согласно третьему закону Ньютона, действует одномоментно и на сооружение, заставляя его отклоняться от положения равновесия, и на массив льда в торце ледового поля, который создает некоторое поле напряжений в сжимаемом объеме льда W_{cr} , имеющем

некоторую глубину L_{cr} . Жесткость сооружения, скорость ледового поля $V_{лп}$ и жесткость (прочность) льда при контакте определяют все наиболее существенные параметры поля напряжений в контактной зоне ледового поля с сооружением (Рисунок 4.4.6- а).

Основным фактором, определяющим общую деформацию льда, является, прежде всего – образование хрупких микронарушений, т.е. макропроцесс упруго–пластического течения складывается из множества элементарных актов хрупких микроразрушений в структурных элементах льда в виде разрыва межатомных и молекулярных наиболее слабых внутренних связей [166,69,45] и проскальзывания по границам кристаллов во всем напряженном объеме льда W . Соотношение между *упругими* (хрупкими) и *пластическими* (вязкими) процессами, их относительная роль в объемном деформировании льда характеризуется показателем его хрупкости [102].

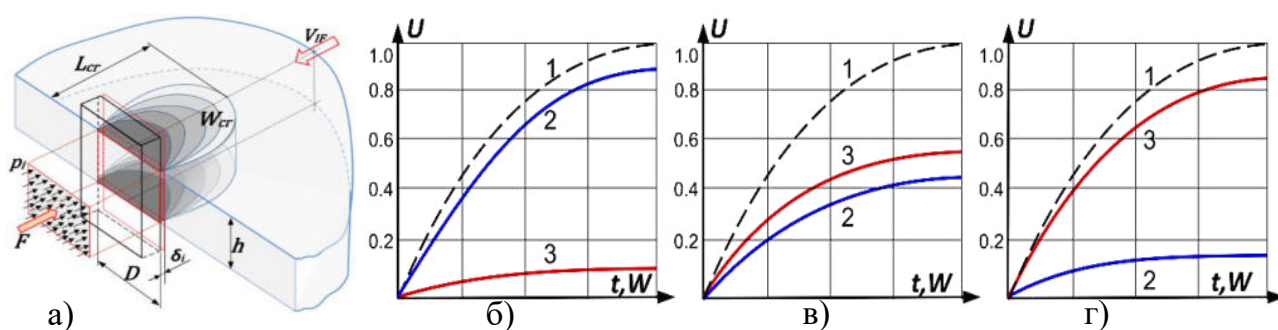


Рисунок 4.4.6 Структурно – энергетический анализ распределения энергии в массиве льда в зависимости от его температуры и скорости ледового поля: б) – по вязкому; в) – упруго-пластическому; г) – упруго-хрупкому механизму. 1 – общая энергия деформации; 2 – энергия пластического деформирования (диссипировавшая); 3 – упруго запасенная энергия в сжатом объеме льда

Известно [166,215,69,102], что деформация поликристаллического льда происходит как реализация различных процессов: упругих и пластических деформаций внутри отдельных кристаллов; взаимных перемещений кристаллов относительно друг друга; разделения кристаллов на части. Единый процесс деформирования льда в его напряженном объеме является комплексным и одновременным проявлением различных по своей природе механизмов его деформирования, присущим не только льду, но и большинству реальных материалов [45]. Следовательно, специфическая схема загрузки массива льда (Рисунок 4.4.6, а) в торце ледовой плиты характеризуется – с одной стороны, особенностями структуры и текстуры морского льда, включая наличие прослоек и ячеек рассола как внутри кристаллов льда, так и между гранями соседних кристаллов, а также неоднородность температурных, структурных и прочностных свойств морского льда по его толщине и по площади ледового поля – с другой стороны.

Указанные существенные феноменологические особенности в целом определяют конфигурацию и интенсивность деформаций в поле напряжений в зоне контакта. То есть,

в процессе деформирования одновременно проявляются как *пластические*, так и *хрупкие свойства* соседних, но различно ориентированных и различно напряжённых кристаллов, а также связей кристаллов между собой в структуре массива льда. Поэтому уравнение энергетического баланса в единичном напряжённом объеме льда должно *в режиме реального времени* описывать сжатие льда как конкуренцию *двух одновременно действующих*, взаимосвязанных и противоположных микропроцессов в контактном объёме: а) – накопления скрытой (потенциальной) энергии в структуре кристаллов льда и на поверхностях различного рода дефектов кристаллической структуры; б) – её диссипации в виде пластических деформаций как внутри кристаллов льда, так и в кристаллической решетке и в текстуре льда (поры, примеси, ячейки с рассолом и кристаллы солей), а также передачи тепла окружающему массиву льда в результате пластических деформаций.

Другим важнейшим фактором, определяющим характер процесса деформирования морского льда, является *скорость приложения нагрузки или скорость его деформирования* [102,69,45]. С учетом физического состояния морского льда и феноменологических особенностей его строения, при его деформировании процесс передачи внешней энергии будет непрерывным, а процесс накопления потенциальной упругой энергии всегда будет неравновесным [110,145], потому что даже при незначительных упругих напряжениях в теле часть упругой энергии будет скачками диссипировать в виде пластических микросдвигов в элементах структуры и ее уплотнения, рекристаллизации, слияния или выдавливания дефектов, пор и пр., что характерно и для других материалов [45]. Этот процесс – нормальная реакция структуры льда, имеющей потенциал для поглощения мощности входящего энергетического потока. Это связано с тем, что для льда, как и для других материалов, существует определенное предельное значение **скорости поглощения (рассеяния) энергии** внешнего воздействия, при не превышении которого энергетическое равновесие всех элементов структуры и включений сохраняется.

Учитывая все особенности задачи, *энергия сопротивления* напряженного объема льда [139] $U(t)$ внедрению в него опоры сооружения *в каждый момент времени* в виде основного закона термодинамики запишется так [100,78,24]:

$$U(t) = U_e(t) - U_d(t), \quad (4.12)$$

где: $U_e(t)$ – накопленная в структурных элементах льда энергия упругой деформации; $U_d(t)$ – рассеянная в структуре льда энергия. Известно, что *пластические деформации тела являются результатом действия упругих деформаций*, т.е. диссипация энергии сопровождает процесс ее упругого накопления.

Б. Экспериментальное обоснование: типы механизмов контактного разрушения грани ледовых блоков в зависимости от состояния льда и скорости нагружения.

Очевидно, в качестве меры количества затраченной на разрушение энергии

необходимо применить определенный критерий, устанавливающий условие наступления предельного состояния равновесия в массиве льда, в результате чего наступит разрушение его структуры трещинами. Во второй главе нами было выполнено описание структуры и текстуры морского льда и их особенностей. Отмечено, что существующий в природе в области температурного диапазона, близкого к температурам его фазовых переходов, морской лед обладает очень сложной реологией, существенным образом определяющей его сопротивление нагружению как по его локализации, так и по времени приложения нагрузки. Следует иметь в виду, что если исходить из следствий закона Гука об упругости внутренних связей в теле, препятствующих как его растяжению, так и сжатию, морской лед в разной степени отвечает этому «универсальному» закону в силу трансверсальной анизотропии его структуры и наличия ячеек и прослоек рассола солей, слоистости, наличия воздушных пор и механических включений.

Также, давно и достаточно точно установлена «десятикратная» разница в предельных значениях сопротивления образцов льда при их сжатии и растяжении, а также существенной зависимости этих значений от скорости приложения нагрузки.

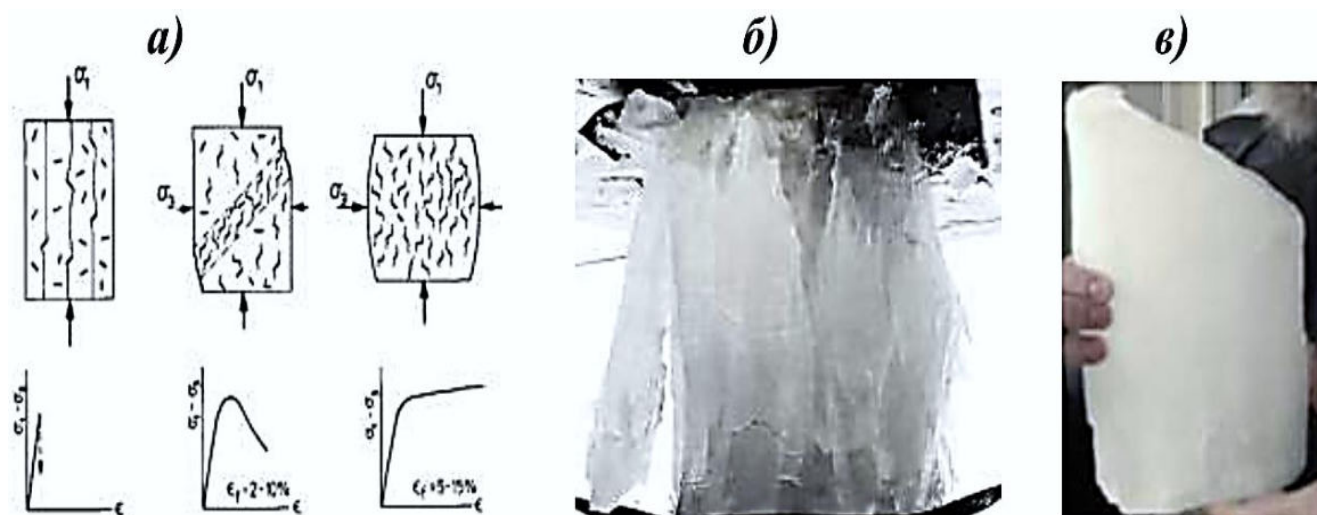


Рисунок 4.4.7 Виды деформирования и разрушения морского льда под нагрузкой по типологии Ashby и Hallam [151] (а) при испытаниях образцов свободным сжатием и примеры автора по испытаниям кубического и цилиндрического образцов

Поэтому для проектирования сооружений, которые должны воспринимать ледовую нагрузку всегда выполняются полевые исследования по определению физико-механических свойств льда. Такие исследования, как правило, выполняются на небольших образцах, которые являясь «представительными объемами» должны в полном объеме отражать свойства натурального массива льда, воздействующего на основания сооружений.

Следует особо отметить, что методика отбора и испытания таких образцов стандартизирована и предполагает использование полученных значений временной прочности льда в нормативном методе расчета ледовой нагрузки с использованием также

нормированного набора необходимых коэффициентов. В тоже время, всем инженерам изыскателям хорошо известна сильная изменчивость характера поведения льда в отобранных образцах, что следует учитывать при составлении рекомендуемых параметров прочности для расчетов ледовой нагрузки на сооружения. На рисунке 4.4.7 приведены возможные варианты реологического поведения образцов морского льда при их испытаниях.

Наблюдаемые особенности механизмов разрушения морского льда при испытаниях его образцов сжатием, безусловно не отображаются в численных значениях пределов его прочности, поскольку стандартным испытаниями установлена скорость нагружения, которая предопределяет максимальное значение временной прочности при сжатии испытуемого представительного объема массива льда.

Но, в такой постановке, когда образцы имеют малые размеры и образец «зажимается» между близко расположенными плитами испытательной машины, стандартный метод испытания и его условия далеко не всегда адекватны процессам деформирования и развития трещинообразования в массиве льда, где разрушение является результатом накопления микрповреждений, их «постепенного» удлинения и слияния с соседними с образованием макротрещин. Этот метод не соответствует даже испытанию образца на двухосное сжатие (Рисунок 4.1.2).

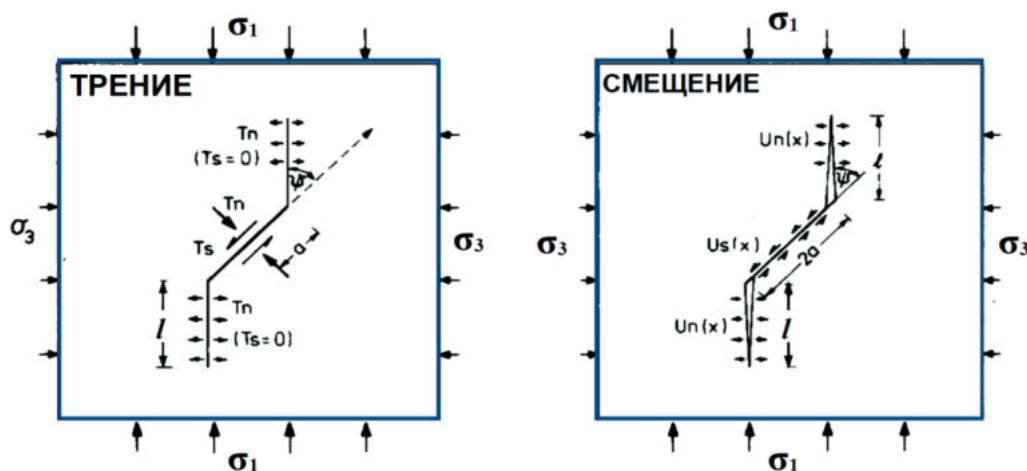


Рисунок 4.4.8 Иллюстрация механизма распространения трещины сдвига путем роста «крыльев» в кристалле льда в условиях сжатия (а), как работы сил раскрытия берегов трещины на длине $2l$ и преодоления сил трения на длине дефекта $2a$. Показаны направления сил трения (T_s и T_n) между берегами трещины и их относительное смещение U_s и U_n , Максимальное смещение скольжения в центре трещины равно $\pm\delta$. (по M.F. Ashby и C.D. Hallam, [151])

Достаточно своеобразные особенности в механизмы разрушения морского льда вносит его строение: текстура и поликристаллическая структура (см. гл. 1), что достаточно часто предопределяет направление и характер развития трещин, как показано на Рисунке 4.4.9.

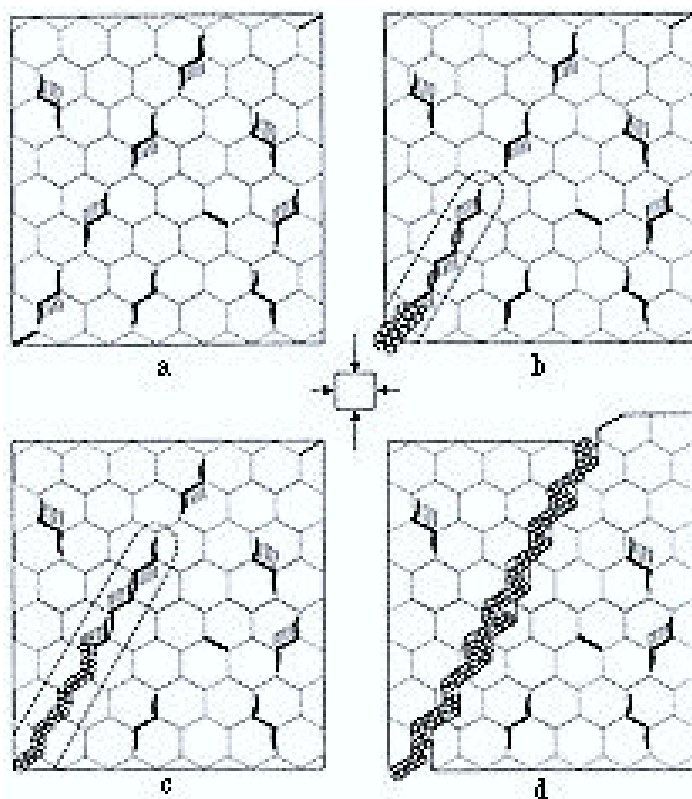


Рисунок 4.4.9 Развитие трещины сдвига в объеме льда путем слияния текстурных дефектов между столбчатыми кристаллами (б) с выходом макротрещины на поверхность деформируемого объема / (по Е.М. Schulson, 1999)

4.4.10.

Картина разрушения трещин в этой зоне в вертикальном разрезе по центральной вертикальной трещине показана на рисунке 4.4.10-б, где трещины в вертикальной плоскости - что отчётливо видно, помимо «правильного» горизонтального расположения могут также, как и в горизонтальной плоскости, иметь «радиальную» направленность.

Причиной того, что многие трещины начинают развиваться «по направлению от центра», является наибольшая **концентрация упругих напряжений** в этом месте контакта, при достижении предельных значений которых происходит лавинообразное трещинообразование. Приведенные феноменологические особенности как структуры морского льда, так и процесса его разрушения на образцах и в массиве ледовой плиты на поверхности цилиндрической опоры сооружения показывают на существенные различия типов механизмов контактного разрушения грани ледовой плиты на опоре в зависимости от состояния льда, скорости его нагружения и типов механизмов разрушения малых образцов из морского льда.

Поэтому достаточно часто разрушение массива ледовой плиты в ее торцевой части, непосредственно воздействующий на поверхность опоры сооружения, начинается с образования центральной «магистральной» вертикальной трещины (Рисунок 4.4.9-б), затем радиальных трещин в вертикальной плоскости и внутри ледой плиты – кольцевых трещин, расщепляющих ее на «слои». Не всегда показанных несоответствий деформирования и разрушения малых образцов, как «представительных объемов» массива льда с реальными процессами в этом массиве, можно избежать, увеличив их размеры, что подтверждают результаты наших исследований, приведенных на Рисунке

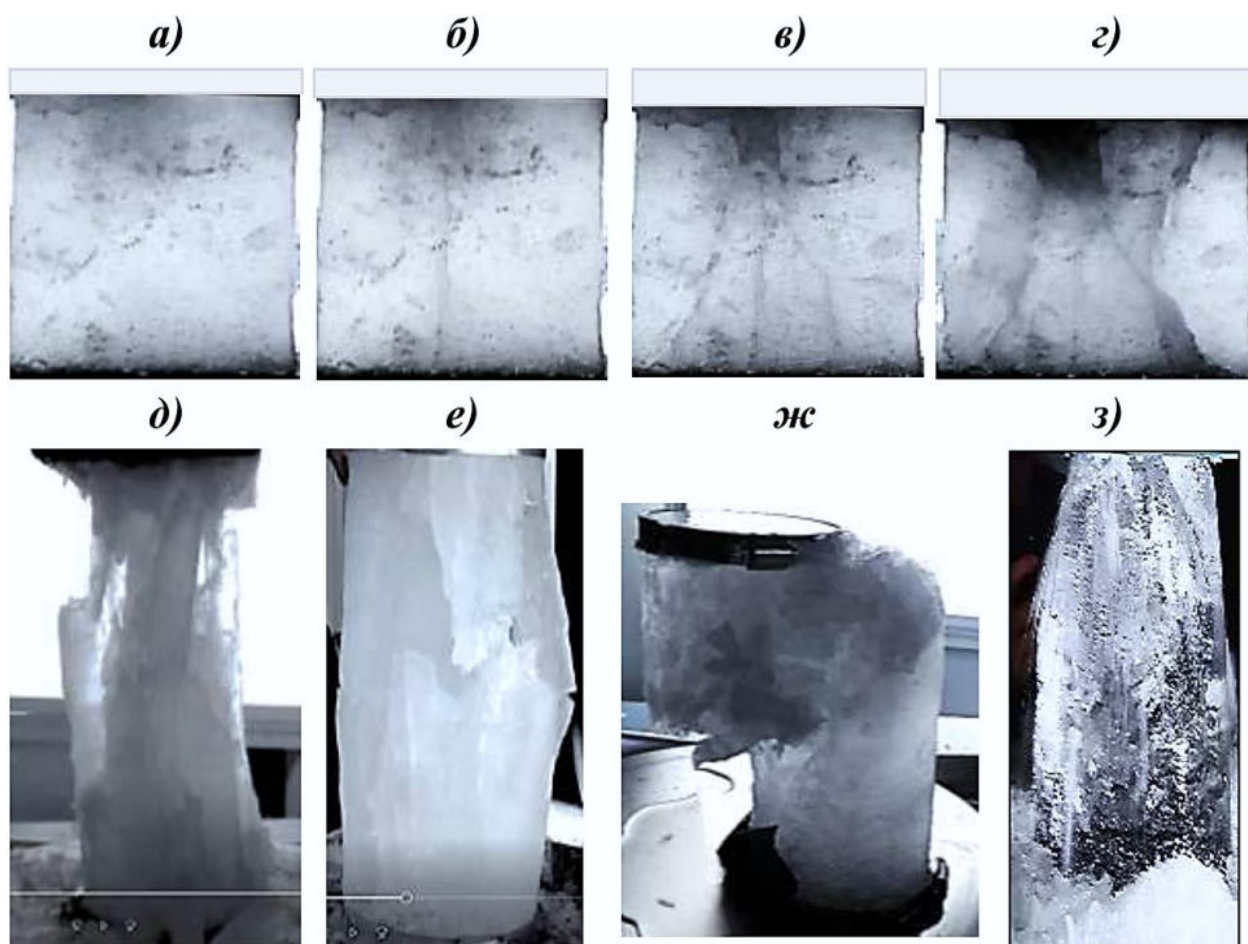


Рисунок 4.4.10 Феноменологические особенности деформирования и разрушения морского льда при испытаниях образцов свободным сжатием: этапы трещинообразования в кубах 20х20 см перпендикулярно плоскости ледового покрова (а-г); цилиндрических 10х40 см в плоскости ледового покрова при разной скорости нагружения (д-з), фото автора

Учитывая, что пластическая деформация есть всегда и она является только частью упругой, второе слагаемое в уравнении (1) всегда будет положительным, поэтому, при медленном нагружении теплого льда практически вся передаваемая льду энергия успевает рассеиваться, практически не нагружая упругие связи структуры: $U_d(t) \equiv U_e(t)$, тогда сопротивление льда внедрению тела $U(t) \rightarrow 0$. В данном случае лед будет работать по схеме вязкого деформирования или текучести, т.е. без характерного развития трещин — «не разрушаясь», просто распадаясь на кристаллы (Рисунок 8, б. Но при *низких температурах* и *высокой скорости* нагрузки поступающая энергия не успевает «поработать» на пути пластического деформирования $U_d(t) \rightarrow 0$, тогда внешняя энергия аккумулируется упруго $U(t) \rightarrow U_e(t)$ и при достижении ее предельного значения в объеме льда $\bar{u}_{cr}$ лед будет разрушаться хрупко, с образованием блоков между трещинами (Рисунок 4.4.10- г). Проведенный объемно – энергетический анализ показывает, что уравнение (1) описывает все

характерные виды разрушения льда в диапазоне от вязкого до хрупкого и оно может быть основой энергетической модели разрушения льда.

4.4.3 Следствие 3. Энергетический критерий адекватно описывает разрушение льда

Понятие адекватности рассматриваемого критерия разрушения льда характеризует его базовое свойство – каждому *строению и физическому состоянию льда* соответствует свое предельное значение плотности упругой энергии разрушения.

В ненапряженном состоянии структура льда как термодинамическая система имеет уровень энергии U_0 (дж) и плотность энергии в системе ε_0 (дж/кг). Приращение плотности энергии $\Delta\varepsilon_e$, передаваемое объему льда *в каждый момент времени* дополнительно посредством волновых энергетических флуктуаций, согласно уравнению баланса энергии (1), частично затрачивается на пластическое деформирование и нагревание массы льда в напряженном объеме, частично рассеивается в прилегающем массиве льда (здесь в балансе не учитывается) и частично упруго накапливается [44,78,102]. Плотность упругой энергии в единице объема льда с учетом ее накопления в зависимости от мощности энергетического потока и скорости диссипации ее части в структуре льда начинает расти с некоторой скоростью и ее текущее значение составляет

$$\varepsilon_e(\bar{r}_*, t) = \varepsilon_0(\bar{r}_*, 0) + \Delta\varepsilon_e(\bar{r}_*, t_*) \quad (4.13)$$

где $\varepsilon_0(\bar{r}_*, t_0)$ – плотность внутренней энергии льда в исходном состоянии ($t=0$), учитывающая его физические свойства в реальных условиях; $\Delta\varepsilon_e(\bar{r}_*, t_*)$ – критическое увеличение плотности внутренней энергии в локальных объемах льда, ответственных за разрушение за время деформирования t_* ; – параметр, характеризующий координаты локального объема льда, ответственного за разрушение макрообъема. В данном случае условие разрушения будет реализовано, когда *плотность упругой энергии*, с учетом ее прироста за время деформирования хотя бы в одном, случайном единичном объеме деформируемого массива льда достигнет предельного (критического) значения ε_{cr} – «удельной энергии разрушения», что *приведет к разрушению* этого, наиболее напряженного элементарного объема льда и далее – к спонтанному процессу «цепной реакции» разрушений в некотором макрообъеме. Это условие записывается в виде:

$$\varepsilon_e(\bar{r}_*, t) \geq \varepsilon_{cr}; \quad \varepsilon_{cr} = const, \quad (4.14)$$

Уравнения (4.12) – (4.14) могут быть интерпретированы графически (Рисунки 4.4.6 и 4.4.11). Из уравнения (1) следует, что значение накопленной в напряженном объеме льда плотности упругой энергии есть разница всей энергии, поступившей в него и энергии,

диссипировавшей в элементах структуры льда. Предельным значением плотности удельной упругой энергии, вызывающей разрушение льда, согласно уравнению (3), является значение ε_{cr} (точка X на Рисунок 9, а). Ниже покажем, как работает этот критерий по формированию процесса циклического разрушения льда в зоне контакта ЛП с МЛО.

4.4.4 Следствие 4. Энергетический критерий – регулятор частоты разрушения льда

Из закона сохранения энергии [78,100,24] следует, что при равенстве скорости притока энергии и скорости диссипации энергии в напряженном объеме материала в процессе его деформирования имеет место «пограничное» равновесное состояние (4.12) и разрушения не происходит. Но, как было показано в предыдущем параграфе, существует *предельная максимальная* скорость диссипации потока внешней энергии в структуре льда, соответствующая этой структуре и его физическому состоянию. Если скорость притока (мощность) внешней упругой энергии в напряженный объем льда превысит эту максимальную скорость ее диссипации во льду, то на некотором временном промежутке это приведет систему элементов структуры льда к предельному неравновесному состоянию: будет резко достигнуто *критическое значение плотности упругой энергии* внутри кристаллов (дислокаций, ячеек рассола) и на их границах (поверхности дефектов, прослойки рассола), что приведет к росту количества и размеров микротрещин, к их слиянию и пр. и, как результат – к диссипативному фазовому переходу системы с образованием макротрещин, т.е. к развитию разрушения напряженного объема. Источником энергии для разрушения данного объема льда является накопленная в нем энергия упругого деформирования структуры льда $U_e(t)$, которая инициирует образование новых поверхностей и распределится на них в *виде поверхностной энергии*, обеспечив энергетическое равновесие в объеме.

Таким образом, условием наступления разрушения является условие превышения *скорости притока* упругой энергии в напряженный объем льда над *скоростью ее диссипации в структуре льда*. Это условие можно записать с использованием уравнений (1) и (2) в виде:

$$\frac{\Delta \varepsilon_e(\bar{r}_*, t)}{dt} = \left(\frac{dU_e(t)}{dt} - \frac{dU_d(t)}{dt} \right) \leq 0. \quad (4.15)$$

Уравнение (4) описывает *механизм регулирования энергетического обмена* между ЛП и МЛО следующим образом. В процессе воздействия ледового поля на опору сооружения, при постоянной скорости ледового поля и неизменных геометрических параметрах задачи, разность в его правой части обратится в ноль только при одном условии:

когда в некотором микрообъеме льда в массе других, составляющих деформируемый макрообъем в зоне контакт, уровень поглощения (диссипации) энергии снизится ввиду истощения возможностей его структуры и текстуры деформироваться пластически, объединять поры, рекристаллизоваться и пр. и начнет расти скорость «упругого насыщения», повышая *плотность удельной упругой энергии*.

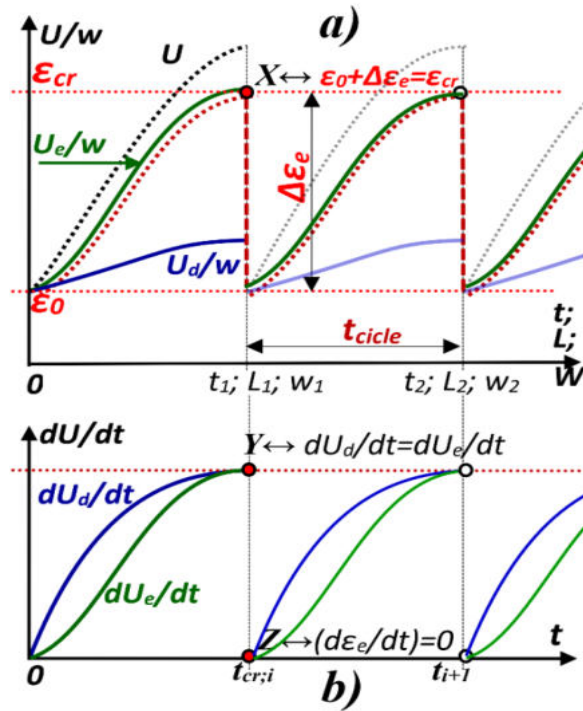


Рисунок 4.4.11 Структурно–энергетическая интерпретация процесса формирования механизма циклического разрушения льда при взаимодействии ледовых полей с сооружениями

В момент времени t_{cr} скорость прироста упругой энергии в напряженном объеме льда сравнивается со скоростью ее диссипации (Рисунок 4.4.11-б – точка Y), т.е. правая часть уравнения (4) обращается в ноль, что будет соответствовать максимальному значению прироста упругой энергии $\Delta \epsilon_e$ (ввиду обращения в ноль ее производной — точка Z на рисунке 4.4.11- б) и плотность упругой энергии, согласно (4.14) достигнет критерияльного значения разрушения льда: $\epsilon_0 + \Delta \epsilon_e = \epsilon_{cr}$ (точка X на рисунке 4.4.11-а;), которое произойдет в момент времени t_{cr} . Затем цикл нагрузки-разрушения повторится для очередного объема льда. Диаграмма этого процесса $\epsilon_e = f(V_{ice}; t)$ имеет пилообразную форму и изображена пунктиром красного цвета на рисунке 4.4.11-а.

Здесь *параметр времени* – один из основных параметров процесса, не только определя-

ющий *момент* начала разрушения льда (t_{cr}) и начала высвобождения упругой энергии, накопленной в его объемах, но и характеризующий тип деформирования и разрушения морского льда его зависимостью от *скорости прироста (мощности) упругой энергии в единичный объем льда*. Поскольку упругая энергия $U_e(t)$ сжатия объема W_{cr} льда эквивалентна затраченной работе внешней силы $A = F \cdot L_{cr}$ на такое деформирование, время цикла разрушения можно достаточно точно определить из простых экспериментов путем деления значения совершенной работы (эквивалентной затраченной на его разрушение энергии) на мощность накопления удельной упругой энергии до достижения ею критического значения:

$$t_{cycl} = \epsilon_{cr} \cdot W_{cr} / \frac{\Delta \epsilon_e}{dt} \quad (4.16)$$

Таким образом, *критическое значение плотности удельной упругой энергии ϵ_{cr}* , достигнутое в сжимаемом объеме льда при его контакте с опорой сооружения

рассматривается нами в данном исследовании в качестве *феноменологического регулятора* потребления фиксированного значения (дозы) *кинетической энергии ледового поля* системой ЛП-МЛО, достаточного для разрушения льда, а также регулятором *частоты разрушения льда*, являющейся причиной явления *генерирования колебаний сооружения* при циклическом воздействии на него нагрузки от ледового поля.

Масса разрушенного льда с плотностью ρ в образовавшейся прорези длиной L_{cr} (Рисунок 4.4.6- а) будет определяться произведением $M=D \cdot h \cdot L_{cr} \cdot \rho$. При известном значении величины ε_{cr} *среднее значение контактной силы* на некотором временном промежутке можно определить по формуле:

$$F_{midl} = \varepsilon_{cr} \cdot D \cdot h \cdot \rho \cdot V(t) \cdot dt. \quad (4.17)$$

Полученная формула кардинально отличается от используемой во многих традиционных методиках расчетов ледовой нагрузки «формулы Коржавина», основанной на парадигме силового подхода, принятого в сопротивлении материалов — записи равновесия полого сечения элемента конструкции с помощью напряжений и деформаций (давления льда на площадке контакта с сооружением).

4.5 Верификация метода определения величины ε^* сравнением расчетов ледовой нагрузки с ее применением на индентор и на опору сооружения

Здесь рассматривается верификация метода экспериментального определения значений энергетического критерия динамического разрушения льда – удельной плотности упругой деформации ε^* (дж/г), определяемого способом ДБТ [119], путем применения этой величины в расчетах максимальной силы ледового давления:

- на поверхности сферического индентора и
- на опоре гидротехнического сооружения.

4.5.1 Верификация метода определения величины ε^* сравнением расчетных и измеренных значений параметров внедрения сферы в ледовый покров

Первый вариант верификации – сравниваются расчетные значения контактных сил, определенных путем интегрирования импульса перегрузки (Рисунок 4.5.1-в) методом Симпсона, пропорционального изменениям значений контактной силы на поверхности внедряющегося тела.

Считая плиту неподвижной, рассмотрим процесс внедрения тела, имеющего сферическую форму «рабочей» поверхности, в монолит льда. Начиная с начального момента времени соударения индентора с поверхностью ледового покрова, его кинетическая энергия $U=0,5MV_0^2$ в виде волны упругого сжатия льда, будет передаваться ему через поверхность контакта в виде полусферической волны сжатия в его массиве (Рисунок 4.5.1-б), вызывая нарушения его структуры в виде комплекса разрушений (Рисунок 4.1.24-б).

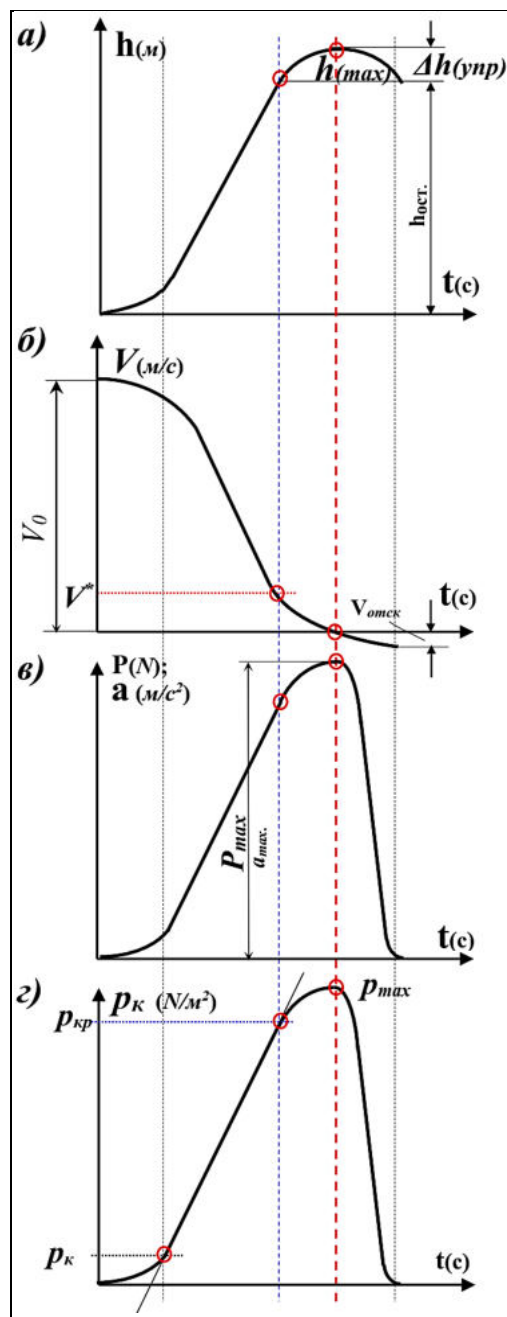


Рисунок 4.5.1 параметры процесса внедрения индентора в поверхность массива льда

Упругая удельная энергия в части массива льда, прилегающей к зоне контакта, достигнув значения предельной плотности при накоплении флуктуаций энергетической волны сжатия для структуры льда, вызовет растрескивание монолита во всех направлениях по радиусам, сходящимся в точке наибольшей концентрации напряжений, являющейся центром площади контакта и по окружностям, концентрически расходящимся от этой точки [49]. Этот процесс является следствием движения индентора, пропорционального его скорости (Рисунок 4.5.1-а). Результатом внедрения будет раздробленный и смятый лед [123,126] сначала крупных, затем все более мелких обломков льда. Индентор остановится в нижней точке своего движения, когда запас его кинетической энергии станет меньше энергии, необходимой для разрушения очередного слоя льда и дальнейшего уплотнения продуктов разрушения (см. Рисунки 4.4.1 и 4.4.2). После остановки начнется движение тела в обратном направлении за счет сил упругости в объеме смятого материала и в монолите [119] – то есть упругий «отскок». Таким образом, энергия, затраченная на трещинообразование, дробление и смятие всего объема разрушенного материала, может

быть определена как кинетическая энергия тела без учета энергии восстановления скорости обратного движения тела. Для свободно падающего тела массой M с высоты H_0 эта энергия определится следующем образом:

$$U = MgH(1 - k_U), \quad (4.18)$$

$$k_U = V_U/V_0; V_0 = \sqrt{2gH}; V_U = 0,5gt_U^2$$

где k_U – коэффициент восстановления скорости скорость свободного падения тела; t_U – время отскока груза (снимается с осциллограммы, начиная с момента отскока тела до момента начала следующего его удара – Рисунок 4.2.4);

Перемещение поверхности внедряющегося тела $h_i(t)$ происходит со скоростью $V_i(t)$, которая в процессе внедрения снижается от значения V_0 до нуля и получает обратное движение при отскоке индентора. Все параметры, характеризующие процесс внедрения индентора в поверхность льда можно определить из анализа уравнения энергетического баланса, который должен соблюдаться на всех стадиях развития процесса.

Уравнение баланса описывает равенство работы $p \cdot (W_0 - W_i)$, сообщаемой единице массы льда **на фронте волны сжатия**⁶, половина которой превращается в кинетическую энергию (4.18), а остальная работа (4.19) идет на повышение удельной внутренней энергии льда [49]:

$$0,5 \cdot p_i \cdot (W_0 - W_i) = 0,5 \cdot V^2, \quad (4.19)$$

$$0,5 \cdot p_i \cdot (W_0 - W_i) = E - E_0, \quad (4.20)$$

где: $(E - E_0)$ – приращение внутренней энергии, складывающейся из упругой и тепловой (пластической) составляющей [49] (Рисунок 4.4.6) ; p – давление на фронте волны сжатия; W – единичный объем льда.

В условиях не высоких скоростей распространения волны сжатия при динамическом деформировании льда, имеющего небольшой интервал температур между состоянием его существования в природе и точкой плавления, приращение внутренней энергии в единичном объеме льда выражается увеличением ее плотности в массе льда в зоне прилегающей к контакту с поверхностью внедряющегося индентора. Рассматриваемый здесь случай в задачах внедрения тела в преграду [78, 113, 142] относится к задаче аэродинамического воздействия, когда жесткость индентора велика по сравнению с жесткостью массива материала. Для этого случая, согласно законам физики (Рисунок 4.5.1), движение тела будет продолжаться, пока контактное давление p_k превосходит предельное давление, необходимое для разрушения материала (Рисунок 4.5.1-г).

Поэтому, в данной постановке задачи критическое давления в единичном слое⁷ льда у контактной поверхности индентора можно записать как скоростной напор для вязкой жидкости, считая таковой массу мелкодробленых и расплавленных кристаллов

⁶ Смотрите Рисунок 4.1.17 Иллюстрация распространения волны сжатия-растяжения в массиве льда в зоне контакта

⁷ Слой, имеющий толщину единичного объема, внутри которого давление распределено равномерно

льда – результата мгновенного высвобождения упругой энергии, достигшей ее критического уровня в единичном объеме льда, составляющую зону разрушения [49, 113] :

$$p_k = k \cdot \rho \cdot \varepsilon_{cr} = 0,5 \cdot V_k^2, \quad (4.21)$$

где: k – коэффициент вида напряженного состояния индентора и массива льда; V_k - критическая скорость внедрения.

Допуская, что давление на поверхности тела распределено равномерно и величина его постоянна во времени [119], можно записать уравнение для суммарной контактной силы в любой момент времени внедрения:

$$P(t) = k_1 \cdot p_{кр} \cdot F_1(t); \quad (4.22)$$

где $F_1(t)$ - текущая площадь поверхности тела, находящейся в контакте; k_1 - коэффициент увеличения величины контактного давления за счет превышения скорости внедрения над критической скоростью разрушения.

Для тела, имеющего рабочую часть в виде шарового сегмента с радиусом R , глубина внедрения h , в первом приближении пропорциональна квадрату диаметра отпечатка d :

$$h_0(t) = d^2 / 8R \quad (4.23)$$

Следовательно, площадь поверхности внедрившейся части шарового индентора в любой момент времени внедрения выразится формулой:

$$F_1 = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot h_0(t); \quad (4.24)$$

Дифференциальное уравнение движения индентора массой M в среде с сопротивлением $P(t)$ запишется в виде:

$$Mh_0'' + 4\pi R h_0 k \rho \varepsilon_{cr} = 0; \quad (4.25)$$

Решение уравнения (4.25) будет иметь вид:

$$h_0 = (V_0/A) \cdot \sin At; \quad (4.26)$$

$$\text{где} \quad A = k_1 \rho \varepsilon_{cr} 4\pi R/M; \quad (4.24)$$

Глубина внедрения тела достигает максимума в момент времени t_{max} :

$$t_{max} = \frac{\pi}{2A}; \quad h_{0,max} = \frac{V_0}{A} = V_0/2\sqrt{k_1 \rho \varepsilon_{cr} 4\pi R/M}, \quad (4.27)$$

Максимальная величина контактной силы (4.23) переписывается в виде:

$$P(t) = 2V_0 \sqrt{k_1 \rho \varepsilon_{cr} 4\pi R/M}; \quad (4.28)$$

а время ее наступления определится из выражения:

$$\tau = t_{max} = \pi/4\sqrt{k_1 \rho \varepsilon_{cr} 4\pi R/M} \quad (4.29)$$

Подробные решения для определения глубины внедрения индентора h , максимального значения контактной силы P_{max} и времени его наступления τ для индентора со сферической поверхностью получены и опубликованы автором в соавторстве в статье [119]. В этой публикации показано, что глубина внедрения тела, контактная сила и время активной части удара зависят от массы тела и физико-математических характеристик материала полупространства, т.е. льда. Кроме этого h и P пропорциональны величине скорости, а τ и h , зависят также от кривизны поверхности индентора.

4.5.1.1 Расчет сил контактного ледового давления по осциллограмме ударного импульса

Для проверки полученных параметров ударного процесса (4.27) – (4.29) были проведены КОНТРОЛЬНЫЕ ОПЫТЫ для определения удельной энергии механического разрушения льда методом ДБТ на натурном льду и для записи при этом сигналов датчика перегрузок. Для производства опытов использовались инденторы – специально обработанные три стальные отливки в виде шаровых сегментов (полусфер) массой $M_1 = 300$ кг (груз 1), $M_2 = 163$ кг (груз 2), $M_3 = 102,5$ кг (груз 3) с радиусами 28,9 см, 23,9 см и 19,5 см соответственно.

Дальнейший план выполнения процедуры верификации сводился к следующим процедурам:

- определение расчетных значений удельной энергии механического разрушения льда;
- интегрирование записанных импульсов ускорений для каждого события (удара) для определения параметров ударного процесса, включая среднее и максимальное значение контактного давления;
- измерения реальных значений размеров отпечатка груза во льду и объема разрушенного льда в каверне разрушения.

Методика проведения экспериментов была неизменной с описанной выше. Импульс удара записывался на фотоленту, для обеспечения удовлетворительной точности снятия данных с осциллограммы скорость фотоленты задавалась равной 200 и 400 см/с.

Кроме того, выполнялись измерение плотности льда методом гидростатического взвешивания (для верхних слоев льда составила величину $\rho = 0,926$ г/см³ и значения статического предела прочности льда на сжатие. Величина σ_0 для кубиков с размером ребра 5 см, вырезанных из горизонтов 3-10 см, предел одноосной прочности льда имел среднее значение 294 н/см² из 69 определений при разбросе значений от 100 н/см до 380 н/см² и температуре образцов в пределах -4,5 + -9,5 °С.

Величина модуля нормальной упругости определялась сейсмическим методом и колеблется в небольших пределах от $74 \cdot 10^4$ н/см² до $96 \cdot 10^4$ н/см² (по средним значениям из 10-15 определений для каждого случая).

В объеме разрушенного материала учитывался не только объем отпечатка, но и объем продуктов разрушения, спрессованных грузом и вытесненных им. Для этого была установлена зависимость между величиной объема отпечатка W_o и величиной полного объема W_f измеряемого после удаления продуктов разрушения:

$$W_{full} = (2,6 - 2,8)W_o . \quad (4.30)$$

Но полученные таким образом данные будут заведомо несколько завышены, так как невозможно учесть энергию, идущую на образование трещин в монолите, разлет осколков, возбуждение упругих волн, возникающих в ледяном покрове при ударе индентора. При толщине льда более 0,5 м доля энергии упругих волн будет незначительна. Хейсин Д.Е. и Лихоманов В.А. [114] оценивают эту величину равной 1-2 % от кинетической энергии индентора.

Согласно формуле (4.1.8), величина предельного давления необходимого для дробления льда, согласно данным на графике 4.1.10 для температуры льда -4°C будет равна:

$$p_k = k \cdot \rho \cdot \varepsilon_{cr} = \frac{1}{2,7} \cdot 0,926 \cdot 12,0 = 412 \text{ Н/см}^2 \quad (4.31)$$

Для примера приведем значения контактных давлений, возникающих при сбросе индентора – груза 1 с различных высот на лед, имеющий такую же, как и в приведенном примере, температуру (Таблица 1).

Таблица 4.1 Расчетные значения контактных давлений

		Высота сброса индентора H_0 , (м)							
		0.1			0.5			1.5	
t^*	V_0	a / g	$p_k,$	V_0	a / g	$p_k,$	V_0	a / g	$p_k,$
	м/сек		Н/см ²	м/сек		Н/см ²	м/сек		Н/см ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,0	1,4	0,0	0,0	3,13	0,0	0,0	5,42	0,0	0,0
0,2	1,35	8,56	545	3,00	24,6	608	5,30	22,6	649
0,4	1,20	21,4	668	2,59	58,2	830	4,76	86,5	679
0,6	0,92	35,1	789	1,92	76,2	834	3,88	158,1	905
0,8	0,51	47,1	882	1,04	98,5	857	2,07	203,3	967
1,0	0,0	55,6	1030	0,0	109,7	1040	0,0	210,8	1069

Контактные давления рассчитаны, исходя из предположения равномерного распределения контактного усилия по поверхности контакта. Все величины приведены для времени от начала контакта до момента максимального нагружения (t_{max}). Расчет приведенных величин производился путем интегрирования графика ударного импульса, записываемого на осциллограмму [4].

Из таблицы 4.1 видно, что контактные давления p_k во всех трех случаях имеют сравнительно стабильную максимальную величину [119], независимо от начальной скорости внедрения и максимальной величины перегрузки тела и, возрастая, достигают значения 1100 Н/см^2 , что на порядок выше величины предела прочности льда на статическое сжатие. Во всех показанных случаях контактные давления в начале удара превосходят величину предельного давления $p_{кр}$, полученного по формуле (4.18), так как рассмотрены примеры для скоростей V_k .

Для примера: для пресного льда $V_k = 50 \div 120 \text{ см/сек}$ [114], для морского льда $V_k = 80 \div 100 \text{ см/сек}$ [113], что подтверждается полученными данными (Таблица 4.1). Для скорости $V_0 = 140 \text{ см/сек}$ предельное давление $p_k = 545 \text{ Н/см}^2 > p_{кр} = 412 \text{ Н/см}^2$ для данной температуры льда. Очевидно, что для скорости $V_0 < V_k$ внедрение не будет носить характер дробления и смятия, а качественно изменится.

4.5.1.2 Верификация метода расчета контактного ледового давления по осциллограмме ударного импульса

Процедура верификации состоит в *сравнении расчетных значений параметров* явления внедрения индентора в поверхность ледового покрова с *измеренными в эксперименте значениями* или со значениями, полученными *расчетом с подстановкой экспериментальных данных* в расчет в качестве исходных данных.

В качестве величин для сравнения выбраны наиболее характерные величины для данного процесса: t – время активной части внедрения, т.е время достижения контактной силой своего максимального значения (s); P_{max} – максимальное значение контактной силы (N); h – глубина внедрения индентора в массив льда.

Время активной части удара t определялось непосредственно по осциллограмме. Из Рисунка 4.5.2-а видно, что экспериментально полученные точки для различных инденторов хорошо совпадают с зависимостями, построенными по формуле (4.26). Необходимо

отметить, что время активной части удара не зависит от начальной скорости внедрения индентора. Все зависимости построены при температуре поверхности льда $T = (-7,5 \div -3,5) ^\circ\text{C}$ для коэффициента $k_I = 1,60$, определенного из данных интегрирования ударного импульса следующим образом.

Уравнение движения индентора составлено нами в предположении, что сопротивление движению индентора постоянно на всем протяжении его движения и равно P , при этом должно выполняться условие $P > P_{кр}$. Поэтому все показанные на графике точки – средние значения экспериментальных данных, определившиеся из 25-30 определений для каждой точки. Цветные отрезки пунктирных линий – графическое изображение зависимости времени активной части контакта индентора со льдом, построенное по формуле (4.27).

На Рисунке 4.5.2-б и 4.5.2-в показаны [129] построенные по формулам (4.25) и (4.26) зависимости максимальной контактной силы P_{max} максимальной глубины внедрения тела h_{0max} от скорости его внедрения для грузов 1, 2, 3 (I, II, III соответственно). Из графиков видно, что указанные характеристики имеют линейную зависимость от скорости внедрения тела и его массы. Глубина отпечатка зависит также от радиуса рабочей части тела. Все точки – средние значения данных, полученных из 5-8 определений для каждой точки. На рисунке 4.5.2-б также приводятся для сравнения данные авторов (не закрашенные точки), исследовавших эти параметры на пресном озерном льду, но с теми же параметрами инденторов IV и V, что и в данном исследовании.

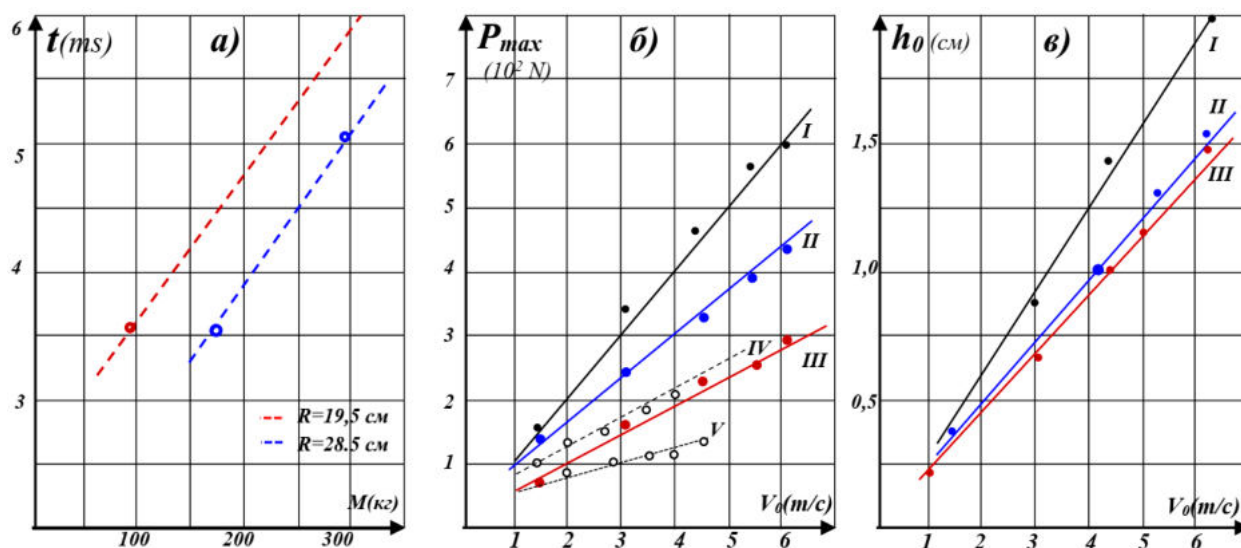


Рисунок 4.5.2 Зависимость времени активной части удара от веса груза и радиуса его рабочей части(а); максимальной контактной силы (б) и глубины внедрения полусферы в лед (в) в зависимости от начальной скорости индентора

4.5.2 Верификация метода определения величины ε^* сравнением расчетных и измеренных значений параметров внедрения сферы в ледовый покров

В работе автора [124] впервые в качестве прочностной характеристики морского льда для расчетов ледовой нагрузки было предложено применять удельную энергию механического разрушения морского льда, основные свойства и численные значения в широком диапазоне температуры льда уже были получены. Для обеспечения адекватности расчетов, формулы ледовой нагрузки на цилиндрическую опору морского гидротехнического сооружения были получены решением дифференциального уравнения движения ледового поля, встречающего сопротивление в виде разрушающегося ледового покрова [124,263].

Решения уравнений движения ЛП были сделаны как для остановки ледового поля, так и для его прорезания. Учитывая, что в расчетах ледовой нагрузки для статической задачи принимаются средние значения контактных давлений в процессе взаимодействия ледяного покрова с поверхностью цилиндрической опоры со льдом, формулы (4.28) с учетом (4.21), соответственно, преобразовались. Для случая внедрения опоры в ледовое поле и остановке его движения, расчетная формула получила вид:

$$P_{max*} = 1,85vH\rho\sqrt{\Omega\varepsilon\sqrt{D}} \quad (N) \quad (4.32)$$

Для случая непрерывного прорезания опорой сооружения ЛП формула принимает такой вид:

$$P_{max} = 0.1HD\rho\varepsilon \quad (N) \quad (4.33)$$

На Рисунке 4.5.3 показаны [124] результаты сравнения результатов расчетов ледовой нагрузки на сооружения по приведенным выше формулам с данными полученными экспериментально другими исследователями, регистрировавшими процесс взаимодействия ледовых полей с опорами речных сооружений во время ледохода.

В случае прорезания льдин опорой (Рисунок 4.5.3-а) наблюдается выраженная стабильность в величинах как рассчитанных, так и измеренных в натуре нагрузок [59]. При этом *рассчитанные по формуле автора (4.31) значения нагрузок практически совпадают с измеренными в натуре В.А. Кореньковым* (красная линия). В тоже время, рассчитанные для таких-же исходных данных по рекомендуемым СНиП П-57-75 формулам⁸, значения получаются значительно завышенными по сравнению с измеренными в натуре.

В случае остановки льдин у сооружения расчетные значения контактных сил, рассчитанных *по методике автора (красная пунктирная линия) удовлетворительно*

⁸ Десвующий нормативный документ на момент публикации «ссылочной» статьи

коррелируют со значениями, измеренными в натуре К.Р. Ниллом [79] (Рисунок 4.5.3-б). Расчеты, по предлагаемой формуле (4.30) с применением величины $\mathcal{E}^*$ дают близкие к измеренным в натуре значения нагрузок ($K = 1,1$), хотя и имеют разброс (коэффициент корреляции $r = 0,6$). Расчет по действующим нормам дает завышенные результаты.

Очевидно, что разброс значений обусловливается нестабильностью процесса начального внедрения, большой зависимостью величин нагрузок от кинетической энергии льдин и внецентренностью их ударов об опоры.

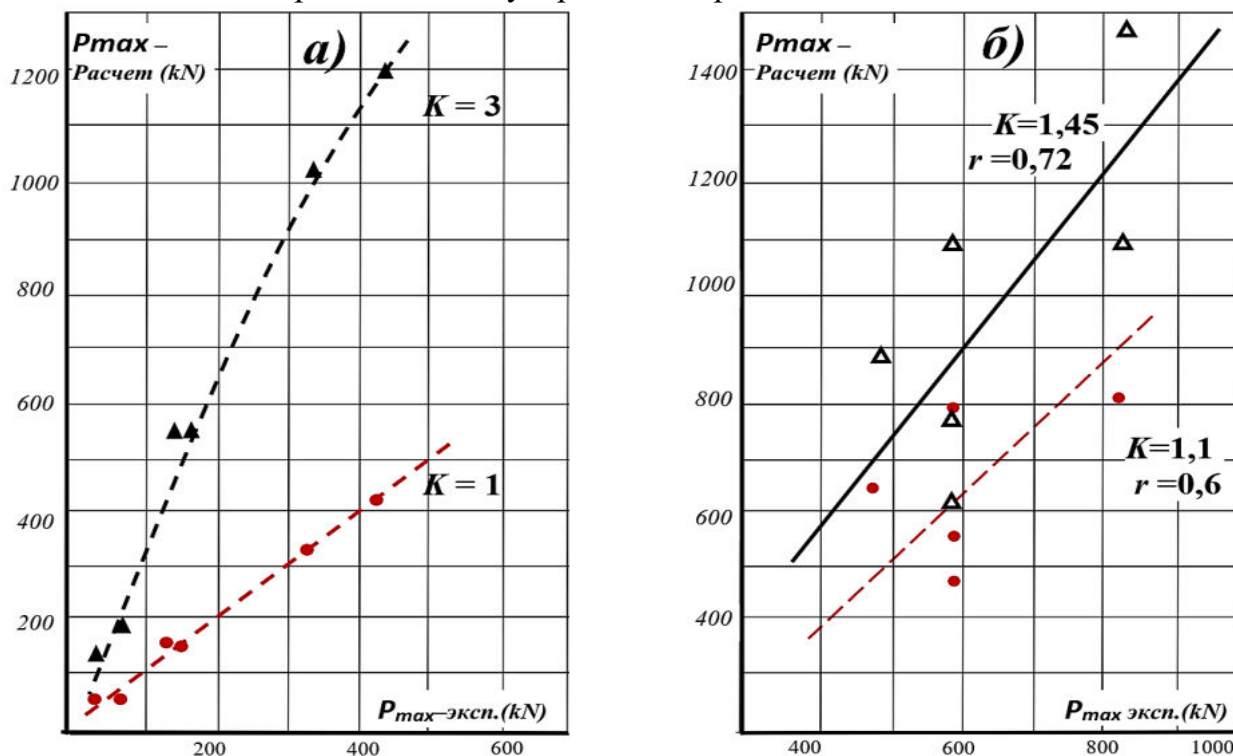


Рисунок 4.5.3 Сравнение результатов расчетных и измеренных значений ледовой нагрузки на цилиндрические опоры гидротехнических сооружений от действия льда: а) – при прорезании ЛП опорой; б) при остановке льдин

В целом можно констатировать, что предлагаемый к применению в расчетах ледовой нагрузки динамический критерий контактного разрушения льда адекватно отражает механику взаимодействия ЛП с опорами сооружений, его применение в расчетах дает удовлетворительную сходимость данных расчетов с результатами измеренных значений ледовой нагрузки.

Эффективная удельная плотность упругой энергии $\mathcal{E}^*$ может применяться в расчетах ледовой нагрузки в качестве динамического критерия разрушения льда и проведенные исследования позволяют рекомендовать дальнейшую разработку этого динамического критерия прочности для применения его в расчетах параметров цикличности ледовой нагрузки на морские ледостойкие сооружения.

Выводы по главе 4

1. Анализ результатов экспериментов подтвердил ранее принятую **гипотезу динамического критерия разрушения льда – эффективной критической плотности**

удельной упругой энергии в структуре льда – ϵ^ , регулирующей **параметры цикличности процесса** его упруго – пластического разрушения, обусловленные природой **последовательного** накопления упругой энергии в слое льда в напряженной зоне и поочередным разрушением нескольких слоев льда при продолжении воздействия индентора до исчерпания запаса его кинетической энергии, что генерирует **циклически повторяющийся процесс, характеризующийся скачками давления** на контакте индентора со льдом.*

2. Выполненные исследования новой характеристики динамической прочности льда показали, что она наилучшим образом отвечает основным требованиям, предъявляемым к такого рода критериям: физической адекватности, математического описания, инвариантности и воспроизводимости. Здесь условие прочности морского льда с использованием исследуемого критерия разрушения имеет четкий физический смысл, описывается математически, показатель прочности определяется из простейших опытов, обеспечивающих инвариантность и полную воспроизводимость получаемых значений критерия.

3. Методика экспериментального определения эффективных значений удельной энергии механического разрушения льда обоснована теоретически и проведением полного факторного эксперимента.

4. Экспериментальные исследования показали, что картина разрушения льда при внедрении в его массив жесткой сферы отражает комплекс процессов: раздробления, смятия и выжимания продуктов разрушения из зоны контакта, которые практически невозможно описать комплексно с использованием силовых критериев, в отличие от энергетического критерия, имеющего свойство интегративного учета затрат энергии на весь комплекс процессов в явлении разрушения льда, поэтому, такая удельная энергия механического разрушения льда ϵ_{cr} может использоваться в расчетах ледовой нагрузки в качестве критерия разрушения.

5. Выполненные работы по валидации и верификации **метода** экспериментального определения удельной энергии механического разрушения льда ϵ_{cr} , как **энергетической метрики его прочности** в разрабатываемой **математической модели** на удовлетворение **требованиям научности знания об этой физической величине и использования в расчетах ледовой нагрузки ее количественных значений**, показали **удовлетворительный результат: ϵ^* может применяться в качестве энергетического критерия разрушения морского льда.**

6. В то же время, специальное исследование показало, что в качестве «истинного» численного значения эффективной удельной энергии механического разрушения льда можно считать только те значения, которые были определены при полном (100%) использовании энергии индентора (Рисунок 4.3.5) на процессы разрушения без ее остатка в виде полностью законченного цикла разрушения: трещинообразования, дробления, смятия осколков и экструзию продуктов разрушения из зоны контакта (из под поверхности индентора). Наличие не экструдированного льда говорит о незаконченности очередного цикла.

Глава 5 Динамическая имитационная энергетическая модель циклической ледовой нагрузки на морские гидротехнические сооружения

В действующих нормативных документах, что показано в главе 1, в моделях ледовой нагрузки не учитываются ее динамические параметры, поэтому необходимость решения выявленной проблемной ситуации была сформулировано как **методологическая проблема, требующая разработки новой методологии** по определению параметров для расчетов сооружения на воздействие циклической ледовой нагрузки в результате периодического разрушения льда. Основой для разработки новой методологии является Международный стандарт ГОСТ 27751-2014 [37], исходя из требований которого, для выполнения динамического расчета строительных объектов, в данном случае – отдельно стоящих шельфовых стационарных сооружений, на логико-гносеологическом уровне методологического анализа данной проблемы ее актуальность и практическая значимость были акцентированы не только в названии настоящей работы и в ее цели, но и в наборе и последовательности поставленных для ее решения задач.

Следуя методологическим принципам научного исследования проблемы [80, 5]: целостности, комплексности, детерминизма и системности в изучении взаимодействия совокупности объектов ЛП и МЛС; принципам согласованности и соответствия параметров реальных процессов и теоретических моделей и критериев, **методология определения ледовой нагрузки на МЛС** здесь рассматривается как *структурированный поэтапный процесс* [128] получения решения проблемы в виде совокупности ее согласованных и нормативно регламентированных частей [37]. В предшествующих главах показаны уже разработанные элементы методологии: детерминистская расчетная механическая **модель** ледовой нагрузки от ЛП, воздействующего на неподвижное МЛС; теоретическое обоснование энергетического **критерия разрушения** природного морского льда и экспериментальные **способы** получения этого критерия. Совокупность этих элементов, в соответствии с *принципом восхождения «от частного к общему»*, является базой для разработки **метода получения расчетных** максимального **значения контактной силы** ледового давления и **расчетной частоты циклов** разрушения льда, которые разработаны в данной главе наряду с **методом верификации** расчетных параметров ледовой нагрузки.

Выполненные в первой главе анализ нормативных документов по определению статических ледовых нагрузок на МЛС показал, что модель расчета ледовой нагрузки, используемая в Нормах на соответствует реальным механическим процессам разрушения

льда. исследовавшиеся многими авторами, анализ результатов работ которых показан во второй главе. На основании результатов процедур системного анализа процесса взаимодействия ЛП с МЛС и решению феноменологической модели, адекватной этому процессу, выполненным в третьей главе, автором в качестве критерия разрушения был предложен энергетический критерий разрушения льда $\mathcal{E}_{cr}$. В двух последующих главах были рассмотрены существующие экспериментальные методы определения его численных значений и разработан новый, запатентованный автором метод определения этого критерия испытаниям больших образцов на динамическое сжатие. Следующие шаги для наполнения разрабатываемой методологии, следуя принципу от частного к общему, направлены на решение следующих задач:

- **выполнить «специфически узконаправленный» анализ** моделей автора и известных современных моделей динамических ледовых нагрузок с **целью** поиска разработанных и численно апробированных характерных элементов расчетных моделей ледовых нагрузок, их экспериментальную проверку на предмет адекватности реальным процессам формирования ледовой нагрузки на МЛС и выбрать элементы таких моделей в качестве прототипов для их доработки и включения в разрабатываемую энергетическую модель;

- **выбрать и обосновать концептуальный подход**, однозначно определяющий **тип описательной модели механизма**, управляющего процессом прорезания ЛП опорами МЛС, в котором наиболее адекватно сочетаются влияния на явление появления колебаний МЛС, воспринимающего воздействие ровного ледового поля, внешних и внутренних параметров, влияющих на процесс;

- **разработать имитационную модель** механизма разрушения морского льда с учетом его строения, физико-механических параметров и влияния на процесс его контактного разрушения факторов внешней среды и параметров задачи и выполнить ее прямые верификации методами численного и физического моделирования и сопоставление с моделями других авторов;

- **показать место** разработанного в предыдущих главах работы энергетического критерия разрушения льда – эффективную удельную энергию механического разрушения льда $\mathcal{E}_{cr}$ и **показать** также его «управляющую» роль в функционировании в предложенной модели расчета циклической ледовой нагрузки на МЛС;

- в рамках выбранного подхода с конкретным механизмом разрушения льда **сформировать феноменологическую модель расчета** параметров циклических ледовых нагрузок на МЛС для выполнения его динамического расчета и учитывающую такие параметры, которые однозначно согласуется с большинством современных феноменологических теоретических моделей, их численных реализаций, экспериментальных модельных и полномасштабных наблюдений, доступных в литературе;

Решение этих задач позволит продолжить движение к цели работы, получив на базе

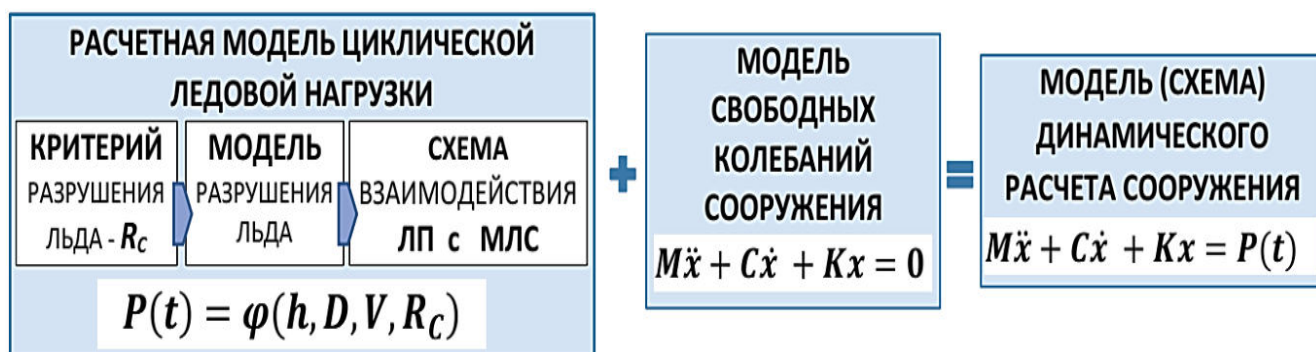
достигнутых результатов, возможность *разработки методики определения расчетных значений* циклической ледовой нагрузки на МЛС: максимального значения силы ледового давления и длительности цикла ледовой нагрузки – периода разрушения льда с использованием критерия динамического разрушения льда, как его порогового для начала разрушения льда значения, регулирующего длительность циклов разрушения льда.

5.1 Место расчетной модели циклической ледовой нагрузки на морское ледостойкое сооружение в методе его динамического расчета

Следуя цели данного исследования и в соответствии с ГОСТ 27751-2014 [37], с учетом динамического характера воздействия, в качестве расчетных параметров **должны быть заданы**:

- интенсивность (амплитуда), место приложения, направление и продолжительность действия пика силы давления ледового покрова на опору МЛС;
- закон изменения нагрузки во времени или характерные частоты и, при необходимости, фазовые углы и спектральные характеристики (энергетический спектр, авто- и взаимные корреляционные функции). (См. Рисунок 1.8.7 в главе 1).

На рисунке 5.1.1 показано общее представление методологически взаимосвязанных элементов системы расчета надежности проектируемого МГТС. Здесь показано, что последовательная реализация всех элементов разрабатываемой в данном исследовании методологии «работает» на модель расчета циклической ледовой нагрузки, на определение ее расчетных параметров для дальнейшего их применения в динамическом расчете сооружения.

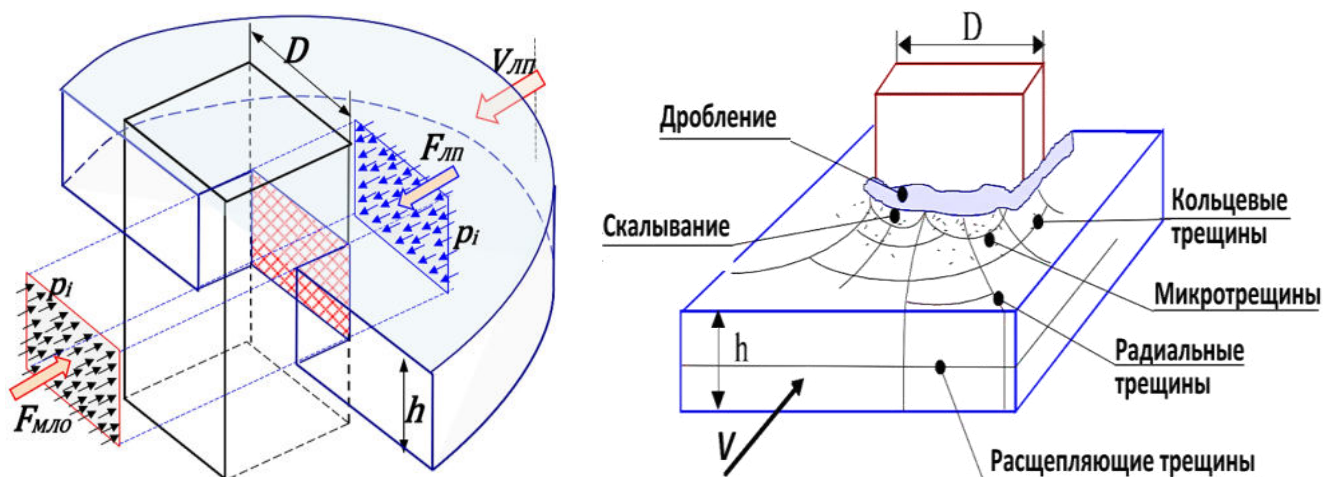


- Рисунок 5.1.1 Общее представление методологически взаимосвязанных элементов системы расчета надежности проектируемого МГТС

В соответствии с общей схемой определения прочностной надежности сооружений, разработанной в главе 1 расчетной модели ледовой нагрузки должна предшествовать

расчетная (принятая) модель разрушения льда на контакте с конструкцией сооружения. В данном случае базовым условием настоящей задачи является принятое априори условие, что из двух элементов взаимодействующих элементов системы ЛП – МЛС второй должен оставаться не разрушаемым, потому что его жесткость (прочность, устойчивость) всегда должна превосходить жесткость (интегральную прочность) льда в зоне контакта ЛП с МЛС. Поэтому здесь механизм разрушения льда (тип, схема разрушения) изначально является объектом исследования, а критерий разрушения – предметом исследования.

Выполненный во второй главе анализ исследований механизмов разрушения льда показал, что используемая в нормативных документах [230,104] модель «непрерывного и равномерного» разрушения льда на контактной поверхности (Рисунок 5.1.2-а) и составленные на их основе расчетные модели вида (5.1) изначально не предназначались для моделирования циклических ледовых нагрузок и не могут быть использованы для этих целей, т.к. в реальных условиях механизм разрушения льда на контакте – это сложный, состоящий из нескольких самостоятельных процессов, развивающихся во времени параллельно-последовательно, комплексный процесс разрушения массива ледовой плиты на некоторую глубину (Рисунок 5.1.2-б).



- Рисунок 5.1.2 Схемы моделей разрушения льда: а) – принятая в нормативных документах [230,104]; б) – по исследованиям многих авторов
 - по представлению в [304,355]

В реальной картине разрушения, как показано в анализе экспериментальных исследований в главе 2, в зависимости от температуры и солёности (состояния) льда, скорости подвижки ледового поля и соотношения ширины опоры и толщины льда, происходит параллельно – последовательное развитие вертикальных радиальных и горизонтальных расщепляющих трещин, кольцевых сдвиговых трещин и трещинообразование – дробление – смятие льда на контактной поверхности льда с сооружением (Рисунок 5.1.2-б).

Описывающая принятую в нормативной методологии расчетную «модель

предельного состояния», изображенную на Рисунке 5.1.2-а формула определения силы ледового давления на опору МЛС представляет классическое описание прочности плоского сечения в напряженном элементе конструкции при ее статическом нагружении в виде:

$$F_{\text{ЛП}} = m \cdot R_{\text{см}} \cdot B \cdot h \text{ (кН)} \quad (5.1)$$

где: $m = k_i \cdot k_j \cdot k_k \cdot k_n$ – «коэффициенты соответствия» – учет скорости ЛП, солёности льда, формы опоры МЛС и плотности ее контакта со льдом и пр. Очевидно, что формула (5.1) может дать **только максимальное постоянное (статическое) значение** ледовой нагрузки на МЛС путем подстановки в нее соответствующих расчетных параметров, в частности – призмной прочности льда σ_o в $R_{\text{см}}$, что не учитывает реального комплекса процессов *сложного* механизма *развития множества трещин различной природы и всего комплекса явлений разрушения льда во времени* (Рисунок 5.1.2,б);

5.2 Концептуальные подходы к выбору расчетной модели описания механизма возбуждения явления колебаний сооружения при разрушении льда

Очевидное несоответствие заложенного в нормативный метод расчета ледовой нагрузки на сооружение простого механизма разрушения льда (Рисунок 5.1.2-а) мотивировало исследователей на разработки моделей расчета ледовой нагрузки, в которых более полно учитывались бы особенности сложного механизма разрушения льда. В частности, по результатам многих исследований, включая и собственные теоретические разработки и эксперименты, было выявлено определяющее значение в формировании циклического характера ледовой нагрузки механизмов разрушения путем развития как трещин отрыва, расщепляющих массив льда в вертикальной и горизонтальной плоскости, так и трещин сдвиговой природы – скалывания (Рисунок 5.1.2-б).

Основываясь на анализе экспериментальных исследований ряда авторов, выполненной в работе автора [117] и на результатах экспериментов выполнявшихся в 1978 году на льду Амурского залива под руководством или в соавторстве автором данного исследования [117,129], а также ряда теоретических разработок [138,134,124,140], автором была разработана блок-схема выбора расчетной формулы для максимальной ледовой силы для трех возможных типов разрушения льда при взаимодействии ледового поля с опорой сооружения (Рисунок 6.2.6), опубликованная в [370,125].

Показанный здесь подход показал необходимость учета, по возможности, всех типов механизмов разрушения льда, но не привел к учету динамических аспектов процесса взаимодействия ЛП с МЛС. Поэтому работы автором были продолжены, был предложен метод расчета ледовой нагрузки с учетом фактора времени.

Динамический расчет МГТС выполняется решением дифференциального уравнения движения сооружения – отклонения его конструкции от положения равновесия под действием вынуждающих сил:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P_{\text{лп}}(t). \quad (5.2)$$

В этом классическом уравнении M - масса МЛС движется в среде с сопротивлением C , пропорциональным скорости отклонения сооружения и при упругости (жесткости) сооружения K , пропорциональным значению этого отклонения.

Для моделирования реакции МЛС на динамическую ледовую нагрузку необходимо в правой части уравнения (5.2) записать закон изменения ледовой нагрузки во времени, «вынуждающий» колебаться МЛС «синхронно, в такт» с заданным законом. Очевидно, что задаваемый «закон возбуждения колебаний» МЛС это – модель (механизм) разрушения льда, основой которого является его **критерий разрушения** (см. Рисунок 5.1.1).

Автором данной диссертации в статьях [138,125] решаются дифференциальные уравнения движения ЛП с учетом силы сопротивления льда разрушению. В одной из работ [138] было получено решение общего вида, показавшее общую кинематику движения ЛП в зависимости от запаса его кинетической энергии. В работе [125] в дифференциальном уравнении движения ЛП член сопротивления льда учитывает силы, вызывающие развитие трещин в плане ЛП, а также силы, вызывающие смятие льда на контакте. Для этого используются пределы прочности льда на сжатие и на растяжение (решение показано в главе 3). Силы сколов льда не учитываются, но на результате и выводах работы это не сказалось, потому что, как показано в работе, **силовой подход к описанию процессов разрушения** льда не позволили получить адекватное реальному процессу взаимодействия ЛП с МЛС решение.

Выводы из этого раздела состоят в следующем.

1. Создание расчетной модели (формулы) описания механизма возбуждения явления колебаний сооружения при разрушении льда на основе нормативной модели (5.2) не может привести к адекватному результату ввиду отсутствия в этой модели фактора, зависящего от времени процесса, то есть ввиду **отсутствия «генератора» циклов нагрузки**.

2. Учет реальных физико-механических параметров морского льда «по – отдельно» в дифференциальном уравнении движения ЛП в «среде с сопротивлением» дает

возможность продемонстрировать качественную картину возникновения циклического характера нагрузки, но не дает возможности определить количественно параметры циклической ледовой нагрузки ввиду невозможности точного определения площадей трещин, смятия, а также сил трения, скорости диссипации напряжений в массиве льда во времени и пр. Все эти реальные физические величины в количественном выражении невозможно получить без экспериментальных исследований как свойств льда, так и динамического процесса его разрушения, характеризуемого механизмом разрушения льда.

Поэтому, прежде всего, необходимо использовать полученные многими исследователями экспериментальные результаты по циклическому характеру ледовой нагрузки при прорезании опорой МЛС ледового поля, а также использовать данные специфических экспериментов автора, часть из которых уже описана в предыдущих главах. В следующем разделе все эти данные экспериментальных исследований «встроены» в качестве основы для формирования новой динамической модели ледовой нагрузки на МЛС.

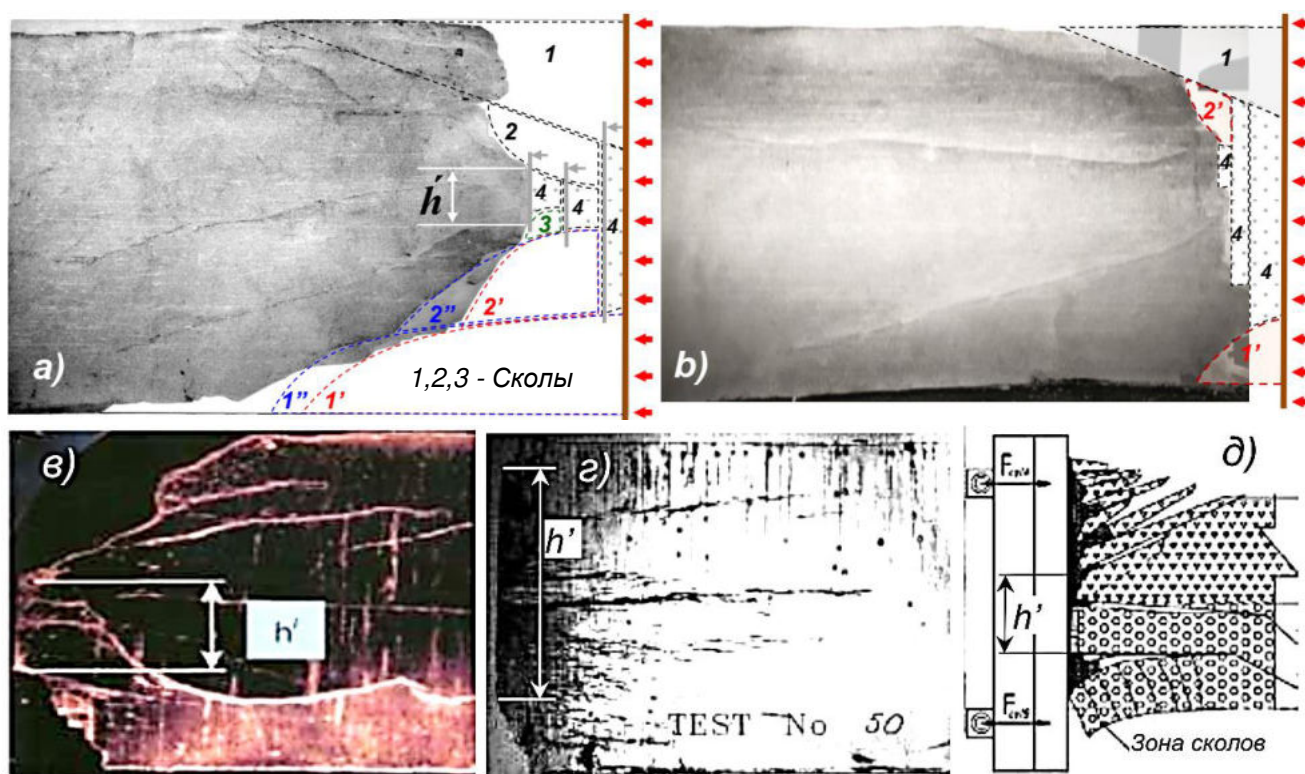
5.2.1 Результаты экспериментальных исследований автора для создания расчетной модели циклической ледовой нагрузки на МЛС

Роль механизма разрушения льда в задачах определения ледовой нагрузки на МЛС состоит в том, что каждый из таких механизмов является результатом упорядоченного протекания различных физических процессов, каждый из которых можно описать математически. Экспериментальными исследованиями механизмов разрушения льда, как показал автор [368,139] занималась наиболее многочисленная группа исследователей, начиная с конца 50-х годов (Коржавин, К.Н. и его школа) и подобные работы продолжают в настоящее время. Безусловно, исследования предпочтительно проводить на естественном льду, поскольку натурный лед дает возможность избежать многих проблем моделирования физико-механических процессов его разрушения, а результаты опытов можно напрямую применять для анализа явления.

В экспериментах с натурным морским льдом, выполнявшихся И. Шварцем [336], например, а также К.Р. Кросдэйлом с соавторами [173,171,169] в течение нескольких лет, начиная с 1969 г., были получены записи многоциклового процесса разрушения кромки ледового поля перед моделью опоры. Ими отмечено [368], что помимо развития начальных радиальных трещин в ледовом покрове и сплошного смятия льда по всей его высоте, перед опорой образуется ограниченный объем сильно сжатого льда в виде призмы, внутри которой лед дробится. Все эти наблюдения, в принципе, подтвердили ранние эксперименты К.Н. Коржавина по индентированию образцов пресного льда [63]. Но кроме

совпадающих деталей, в опытах [171,173,169] было показано, что перед опорой происходит выдавливание обломков льда в виде **клинообразных объемов**, сдвигаемых поверхностью опоры в сторону нижней и верхней поверхностей ледового поля. В активно развивающихся исследованиях в 70-80-х годах того же века были показаны различные модификации (моды) видов контактного разрушения льда на контакте поля с опорой, которые приведены во второй главе и на Рисунках 5.1.1-б и 5.1.2а.

В исследованиях, *проводившихся автором, под его руководством, а также с его участием*, процесс взаимодействия ледяного покрова изучался не только *теоретически* [135,134,123,126,125,140], но и экспериментально, в т.ч. в натуральных условиях. Диапазон исследований – от наблюдений за процессами разрушения льда при подвижках припайного льда в прибрежной зоне, где находилось под наблюдением несколько цилиндрических и призматических свай, до проведения полунатурных экспериментов (Рисунок 5.2.2-а.б) [117,368,129,30,365,372,367,371,128], а также лабораторных опытов по запатентованному автором способу динамического сжатия больших призматических и трапецевидных образцов натурального льда с получением цифровых временных рядов изменения нагрузки для получения основных закономерностей процесса разрушения морского льда [82838485,117,368,371,10].

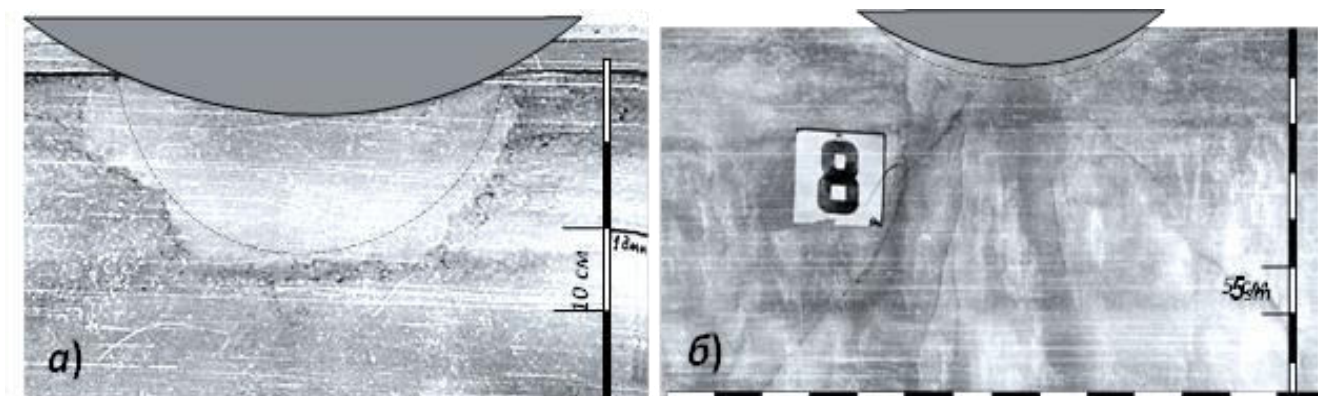


- Рисунок 5.2.1 Фотографии зоны разрушения торца льдины сжатием со сколами и горизонтальными (кольцевыми) трещинами при одноцикловом взаимодействии с моделью опорой: а) – по исследованиям Цуприка В.Г. [368,139]; в процессе прорезания по исследованиям: б) – Трускова П.А, и др. для Сахалинских проектов (1990-е) [19]; в) – Muhonen А. и др. [302]; д) – Карулина и др. [255]

На Рисунке 5.2.2 под обозначениями показаны: h' – уменьшение «эффективной толщины» льда после сколов боковых частей **1,2,3** ледового покрова со смятием средней части «клина» **4** при динамическом разрушении льда Амурского залива Японского моря при горизонтальной скорости $V_0 = 2,5$ м/с индентора массой $M = 450$ кг; а) «холодного» ($-9 \div -10$ °С) и б) теплого ($-3 \div -4$ °С); в) – картина разрушения льда Охотского моря при $V_{\text{лп}} = 0,03$ м/с; г) – интенсивное трещинообразование при $V_{\text{лп}} = 0,03$ м/с; д) разрушение ледовой плиты при скорости прорезания моделью узкой опоры $V_{\text{лп}} = 0,003$ м/с.

Для сравнения на этом Рисунке 5.2.2 приводятся фотографии такого же характера, взятые нами из работ, выполненных разными авторами на Сахалине в 1990г. и в Швеции в 1996, а на рис. 36 - и на Шпицбергене в 2013 году. Из анализа фотографий становится очевидным, что «разрушение льда при воздействии его на сваю, происходит не по «схемам правильного трещинообразования, скола, сдвига или смятия, а представляет собой сложный процесс, включающий в себя все виды напряженно-деформированного состояния льда и все возможные случаи его разрушения» [139]. В первый момент контакта наблюдается рост силы сопротивления разрушению льда с последующим резким спадом ее величины до нуля при образовании системы вертикальных и горизонтальных трещин и сдвиге верхних и нижних элементов (**1,2,3** – на Рисунке 5.2.2).

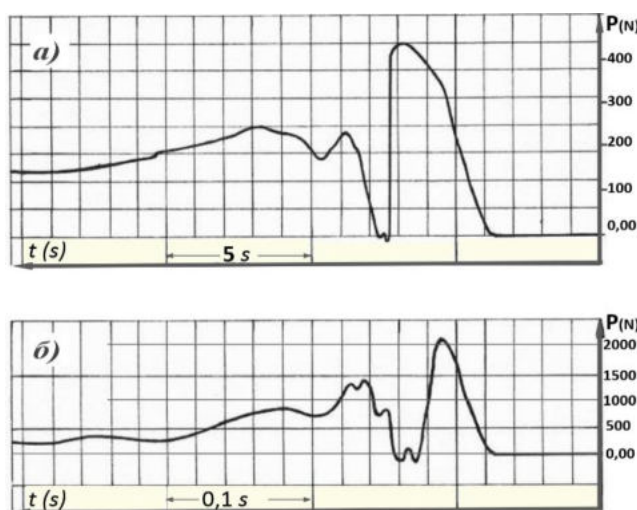
Простое сравнение характера трещинообразования на приведенных фотографиях автора [139,364] (Рисунок 5.2.1-а,б), выполненных на блоках льда, имеющего разную температуру показывает разные типы механизмов разрушения: для холодного льда – механизм упруго-хрупкого разрушения (а), для теплого льда – механизм упруго-пластического разрушения (б). такая же разница в механизмах разрушения наблюдается и в опытах по внедрению инденторов со сферической рабочей поверхностью в поверхность ледового покрова, что показано на Рисунке 5.2.3.



- Рисунок 5.2.2 Фотографии разрезов массивов природного морского льда по оси внедрения жесткой сферы массой $M = 163$ кг и радиусом $R = 28,3$ см, сброшенных с высоты 1,2 (а) и 2,2 м (б) на поверхность морского ледяного покрова толщиной 75-80 см при температуре льда $-3,0$ °С (а) и $-10,0$ °С (б) (фото автора: 1974-1978)

Здесь автор показал, что для теплого льда под внедряющейся поверхностью наблюдается полное разрушение кристаллов льда – превращение их в крошку (а). В холодном льду под местом удара смятый лед занимает значительно меньший объем несмотря на то, что энергия удара увеличилась вдвое, кроме того, здесь наблюдаются сколы льда («звездочкой») в стороны от окружности отпечатка в разрушенном льду. Но самое важное – от места внедрения индентора в радиальных направлениях образовались магистральные трещины, уходящие как в глубину массива льда, так и в стороны от центра в горизонтальной плоскости (Рисунок 5.2.2-б).

Весьма информативными с точки зрения изучения процессов развития деформаций во льду и **начала процесса разрушения** являются записанные осциллограммы силы контактного давления инденторов на ледовый массив, выполненные с разной скоростью воздействующей нагрузки (Рисунок 5.2.3). Можно произвести сравнение характера накопления упругой энергии в зоне контакта на грани ледового поля при статическом воздействии [223] и при динамическом воздействии [364] модели цилиндрической опоры сооружения. Динамическая нагрузка создается ударом в торцевую грань ледовой плиты $h = 0,4$ м модели опоры МЛС цилиндрической формы ($V = 140$ см/с; $D = 56$ см).



- Рисунок 5.2.3 Сравнение характера и длительности накопления упругой энергии в массиве льда при нагрузке от инденторов,двигающихся с разной скоростью:

а) – по Hirayama и др. [223] и б) – по Цуприку В.Г. [364]

вадет диссипировать (микро-сколы, тепло, рекристаллизация структуры под местом контакта и пр.). Следующий, менее выраженный пик нагрузки - раздробление и смятие на некоторую глубину центральной части льдины.

На Рисунке 5.2.5 представлены результаты экспериментов автора по

Статическое воздействие на пластину льда толщиной $h = 1,5$ см создано моделью опоры цилиндрической формы ($V = 0,05$ см/с; $D = 1,5$ см). Поэтому лед разрушается хрупко [364]. Первый пик на осциллограммах характеризует достижение предельного состояния льда под поверхностью модели опоры сооружения и разрушения напряженного объема контактной нагрузки в результате накопления максимально возможной для данного состояния льда (температуры, структуры, солености и пр.) уровня упругой энергии, аккумулируемой в локальной области льда в процессе действия индентора. При этом, (надо иметь это ввиду), часть «входящей энергии» за время действия нагрузки успевает

многоциклового динамическому разрушению высоких образцов морского льда на контролируемое динамическое сжатие с записью временного цифрового ряда всех параметров процесса: контактной силы, скорости движения траверсы испытательной машины и длины разрушаемого участка образца, кроме того, процесс фиксировался на видео (см. главу 4).

В работах автора, в т.ч. с соавторами [10, 117, 364,128] показаны результаты исследований, в том числе и исследований, выполненных под руководством автора в 2016 – 2018 г.г. в лаборатории ледовых исследований Дальневосточного федерального университета. Лабораторное исследование процесса разрушения физической модели центрального блока ледового покрова в виде высокого образца льда трапецевидной формы (Рисунок 5.2.4) подтверждают гипотезу послойного разрушения льда по описанному здесь механизму: после первичных сколов боковых граней – формирование слоя предразрушения; смятие мелких блоков льда; вытеснение продуктов разрушения (крошки льда) из зоны контакта; частичные сколы граней и резкое уменьшение площади контакта; формирование следующего слоя предразрушения в виде растрескивания массива на некоторую глубину множеством хаотично направленных трещин.

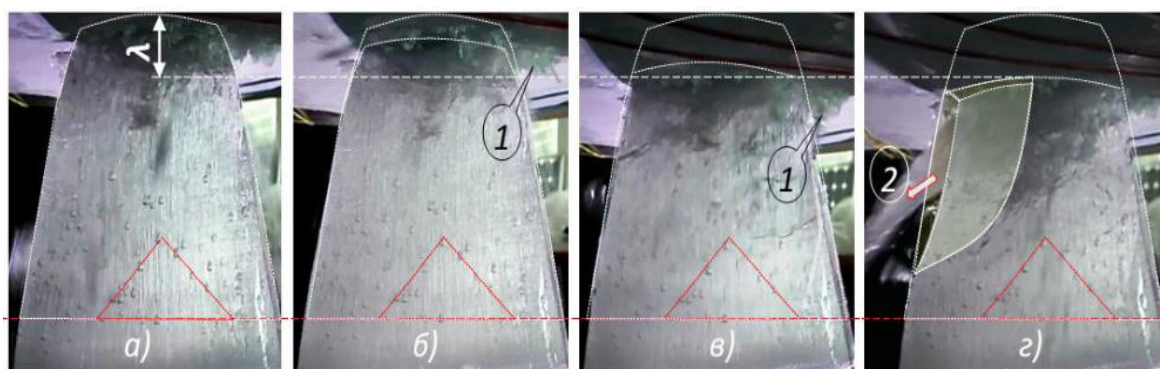


Рисунок 5.2.4 Этапы процесса послойного разрушения льда на контакте с жесткой опорой по экспериментам Цуприка В.Г. [128] на больших образцах: λ – глубина сформировавшегося слоя предразрушения

На Рисунке 5.2.5-а-в [128] показан процесс формирования слоя предразрушения льда с постепенным смятием его слабых участков и выдавливанием крошки за пределы контакта (показано цифрами 1); на фото г) показан момент образования сколов (цифра 2) боковых граней блока льда в результате достижение жесткого контакта. После этого цикла начинается формирование слоя предразрушения следующего цикла разрушения. На Рисунке 5.2.6 показана фотография демонстрирующая ТРИ важных элемента комплексного процесса разрушения льда на кромке ЛП: слой предразрушения льда; следы ступенчатых микросколов льда (стрелки 1 и 2 на фотографии - Рисунок 5.2.5-а) и формирование трещины, расщепляющей блок льда на 2 элемента.

В слое микроразрушений, сформировавшемся непосредственно под поверхностью нагружающей плиты, на Рисунке 5.2.5-д в крупном масштабе видны расслаивающиеся вертикальные «столбики» льда, верхними частями вмерзшие в смятую крошку льда, замерзшую после остановки нагрузочной плиты заново в перекристаллизовавшуюся структуру льда. Поэтому можно однозначно утверждать о том, что граница, отделяющая разрушенный слой льда (деструктурированный слой) от его массива с ненарушенной структурой, реально имеет место в природе и это не монотонная кривая, тем более – не прямая линия.

Еще один важный механизм из комплекса таковых, составляющих процесс разрушения льда на кромке ЛП при его воздействии на опору МЛС – развитие горизонтальных расщепляющих пластину льда на слои трещин (Рисунок 5.2.5-б, в) [128]. Это явление происходит постоянно в процессе взаимодействия ЛП с МЛС в результате впresseвывания продуктов измельчения льда от «внутренних» сколов (направленными внутрь площадки контакта) в образовавшуюся трещину чистого растяжения, сформировавшуюся в начальной стадии в массиве льда вблизи контактной площадки и непрерывно – опережающе «проникающую» вглубь массива ледовой плиты.

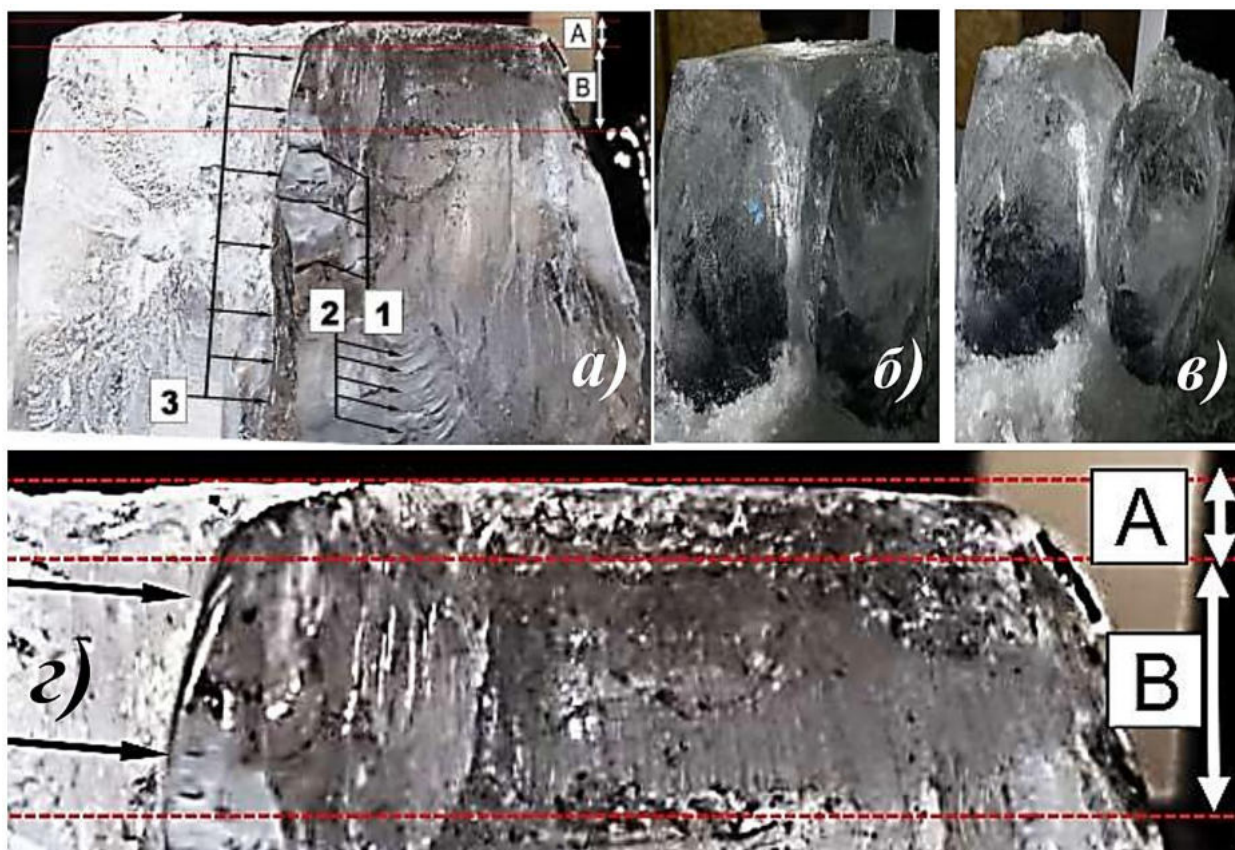


Рисунок 5.2.5 Механизмы послойного разрушения центрального блока ледовой плиты (а и г), сколов и микросколов на свободных поверхностях блока льда (1 и 2), а также развития расщепляющей ледовую плиту трещины (3 и также -б; в)

Результаты полунатурных и лабораторных экспериментов [10, 117, 364, 128], в дополнение к целям, ставившимся для их проведения, дали два важных вывода, которые

подтверждают соответствующие гипотезы. Первый заключается в том, что характер процесса накопления потенциальной упругой энергии в объеме льда при его упругой деформации остается идентичным для разных скоростей приложения нагрузки в диапазоне реальных скоростей взаимодействия между ЛП и IRS. Это следует из сравнения характера двух графиков: нашей диаграммы опыта для высокоскоростного взаимодействия с диаграммой опыта японских исследователей на медленное (скорость на 2 порядка ниже) вдавливание модели опоры в лед, как показано на Рисунке 5.2.4. В качестве второго вывода, в результате сравнительного исследования, следует отметить, что скорость взаимодействия льда с препятствием напрямую влияет на скорость достижения критических значений величины «плотности удельной упругой энергии», что и вызывает разрушение льда. Следовательно, период разрушения льда зависит от скорости ЛП прямо пропорционально.

В настоящее время механизм разрушения льда во всех механико-математических моделях **является феноменологической основой для численного моделирования** процессов разрушения с использованием конечно-элементного подхода. Поэтому, принимая во внимание первостепенную важность учета разнообразия механизмов разрушения льда в комплексном процессе воздействия ЛП на МЛС, в настоящем исследовании картине, представляющей развитие процессов разрушения льда по разным механизмам, **придается первостепенное значение**. Это дает возможность **попытки учета в разрабатываемой динамической модели всех частных процессов и отдельных типов механизмов** развития трещин, основываясь на анализе кинематических, силовых, энергетических и термодинамических аспектов сложнейшего процесса комплексного разрушения льда в торцевой грани массива ЛП на контакте с опорой МЛС (Рисунок 5.2.1).

В целом, анализ записанных процессов взаимодействия льда на реальных эксплуатируемых сооружениях и экспериментальных полунатурных и лабораторных исследований показал следующее [10, 117, 364,128].

1) В зависимости от сочетания **скорости движения ледового поля, «жесткости льда» и упругой податливости опоры частота и амплитуда колебаний сооружения может изменяться в широких пределах**: от не связанных между собой отдельных пиков нарастания-спада контактной силы до квази-постоянного значения с незначительными колебаниями амплитуды со случайным и установившимся спектром частот (Рис.4-в).

2). Существуют определенные **сочетания значений указанных параметров льда и сооружения**, при которых возможно появление **автоколебаний системы «ЛП – МЛС»**, когда могут возникать установившиеся предельные циклы колебаний с максимальной амплитудой, наиболее опасные для сооружения (Рис.3).

3). Ледовая нагрузка является существенно нелинейной функцией и частота колебаний пиков ледовой нагрузки зависит не только от динамических свойств сооружения и

упругих свойств льда, но *значительно зависит от соотношения относительной скорости и толщина льда* (а не диаметра опоры), которые определяют **размеры зоны предразрушения льда** перед опорой (Рис.5).

Эти выводы – как результаты анализа обширных экспериментальных данных дают понятные объяснения закономерностей появления и развития цикличности ледовой нагрузки на шельфовые сооружения – с одной стороны, но с другой – говорят о необходимости дельнейших исследований и показывают их главные направления на пути развития метода расчета МЛС на циклическую нагрузку. Очевидно, что источником, обеспечивающим процессы упругого отклонения МЛС и упругого сжатия напряженного объема льда перед внедряющейся в лед поверхностью опоры, является **энергия движения ЛП**. Таким образом, важнейшим из всех направлений исследований явления *циклической нагрузки на МЛС является, прежде всего, механизм «отбора энергии» ЛП*, затрачиваемой на разрушение льда и *передачи этой энергии МЛС*, заставляя его конструкцию периодически отклоняться от первоначального равновесного состояния.

Результат проведенного анализа показывает, что основными значимыми расчетными параметрами для обязательного учета в разрабатываемых моделях процесса циклического разрушения льда при контактном взаимодействии ЛП с МЛС являются:

- физическое состояние морского льда; его температура и соленость;
- толщина ледового покрова, слоистость льда и изменения свойств по толщине и по площади ледового покрова;
- соотношение ширины сооружения к толщине льда;
- скорость движения ледового покрова;
- жесткость (гибкость) сооружения, форма его «рабочей» поверхности;

Каждый из этих параметров, а также некоторые их сочетания оказывают существенное влияние на выбор определяющего весь процесс взаимодействия типа механизма разрушения льда от вязко – пластического до упруго – хрупкого, от «прорезания без пиков нагрузки», до прорезания, характеризующегося исключительно «пилообразным процессом».

5.2.2 Исследование возможности применения известных концептуальных подходов к моделированию возникновения явления колебаний сооружения при разрушении льда

Для выбора основных элементов разрабатываемой модели, учитывая высокую сложность задачи, необходимо выполнение *детального анализа* нескольких наиболее прогрессивных современных расчетных моделей, основанных на учете феноменологии

строения льда и его физических свойств, принципах механики разрушения и использующих современные численные методы, позволяющие охватить широкий спектр входных параметров задачи и определить степень значимости каждого из них в процессе взаимодействия ЛП с МЛС

. Для анализа *состава физических параметров* процесса взаимодействия ЛП с МЛС, их роли и степени их значимости в формировании *закона движения МЛС* под действием ЛП в процессе контактного разрушения льда рассмотрим некоторые *наиболее характерные модели (схемы) разрушения льда*, применявшиеся разными авторами в *разных концептуальных подходах*.

Многие годы существовали *две общепринятые концепции*, применявшиеся для вычисления параметров циклической ледовой нагрузки с использованием уравнения вынужденных колебаний осциллятора (МЛС), включая разработки расчетных схем взаимодействия на базе моделей разрушения льда:

– **концепция самовозбуждающихся колебаний**, базирующаяся на *«модели отрицательного трения»*, использующая феномен «внутреннего» зависимости прочности льда от скорости его деформирования в стадиях давления льда на опору и опоры на лед;

– **концепция внезапного управляемого снижения или даже «сброса»** по некоторому закону *нагрузки на сооружение при разрушении* напряженного локального объема льда в зоне его контакта с сооружением.

В последние годы был разработан ряд моделей, основанных на широких возможностях их численной реализации, а также модели «спектрального анализа» динамических процессов взаимодействия ЛП с МЛС, использующие:

– **«смешанную схему»** моделирования процесса возникновения автоколебаний в системе ЛП – МЛС, но учитывающую большое количество феноменологических процессов разрушения льда на контакте ЛП с МЛС. Она включает два или три взаимосвязанных уравнения, комплексно учитывающих влияние разных параметров процесса. Здесь, чтобы смоделировать или предсказать правильный результат, к уравнению движения применяется приближенный эквивалентный вынуждающий член, который отличает каждую численную модель друг от друга.

– **методология спектрального анализа** стационарного стохастического процесса генерации самовозбуждающихся или вынужденных колебаний МЛС под воздействием циклических сил, порождаемых разрушением льда на контакте, с учетом временной и пространственной корреляции между *локальными ледовыми силами* и *откликом сооружения*.

Далее представлен *анализ процессов формирования колебаний МЛС при разрушении льда на его контакте с ЛП* в некоторых характерных моделях из исследований в рамках каждой обозначенной концептуальной группы, *с выделением места и роли*

критерия разрушения льда.

Первая концепция «регулирования прочностного параметра льда в процессе его воздействия на сооружение» была предложена в 1970 году Blenkarn К.А. [163], использовавшего для этого экспериментально установленную зависимость предела одноосной прочности морского льда от скорости нагружения его образцов при испытании на сжатие (Рисунок 3.4.4), в последствии многократно обнаруженную в опытах других исследователей [279,321,61,18,64]. Концепция «*модели отрицательного трения*» по Blenkarn К.А. [163] была применена во многих работах [181,244, 250,279,380,21], где этот феномен предлагалось рассматривать в качестве инструмента прерывания потока энергии ЛП, затрачиваемой на отклонение опоры МЛС от положения равновесия в условиях не выявленных и не описанных других инструментов. В этой модели рассматривалось решение преобразованного уравнения (5.2) с измененными параметрами трения и силы:

$$M\ddot{x} + \left(C + \frac{\partial F}{\partial v}\right)\dot{x} + Kx = F(V_r). \quad (5.3)$$

Этот подход к описанию явления цикличности процесса разрушения льда описан нами в обзоре расчетных моделей разрушения льда в главе 3, и он не имеет однозначного аналитического решения ввиду не определяемых на стадии проектирования комплексных взаимозависимостей многих факторов, таких как: *прочность льда; температура и масштаб взаимодействия; толщина ледовой плиты и скорость ее движения; длина разрушаемого участка льда в одном цикле; диаметр опоры сооружения и его изгибная жесткость; объем присоединенной массы воды; параметр жесткости связи сооружения с грунтом основания и пр.*

Как правило, результатами таких исследований являются построения «временных рядов - историй колебаний» сооружений (графиков изменения силы во времени или по длине прорези) под действием ледовой нагрузки с целью поиска подтверждения адекватности данного метода. Поэтому, *развитие вычислительной техники и появление расчетных программных комплексов* позволяющие в настоящее время выполнять численные расчеты по таким моделям колебаний сооружений с учетом «отрицательного трения» и получать результаты для анализа как максимальных значений контактной силы, так и частот ее проявления привели к «новой волне» исследований с использованием метода «отрицательного трения». После 2000 года был опубликован ряд оригинальных работ [219,224,254,235,233,305,377,382,385,383, 19,71], где такие модели с самовозбуждением (self-excited models – SEM) реализовывались численно. Центральное место в таких современных моделях занимает детерминированная зависимость прочности льда на сжатие от скорости нагружения, о чем отмечено выше. Прежде всего вызывающая споры о правомерности данной методологии вообще.

Необходимо принять во внимание факты весьма аргументированного отрицания

концепции «негативного трения», которая постоянно подвергалась критическим замечаниям и несогласием с ее обоснованиями активного исследователя данной проблемы – D. Sodhi [346346] и ряда других ученых. Этот автор возникающие в процессе взаимодействия ЛП и МЛС колебания считает **вынужденными**, объясняя такой подход наличием ряда несоответствий, разрушающих концепцию К.А. Blenkarn и его последователей.

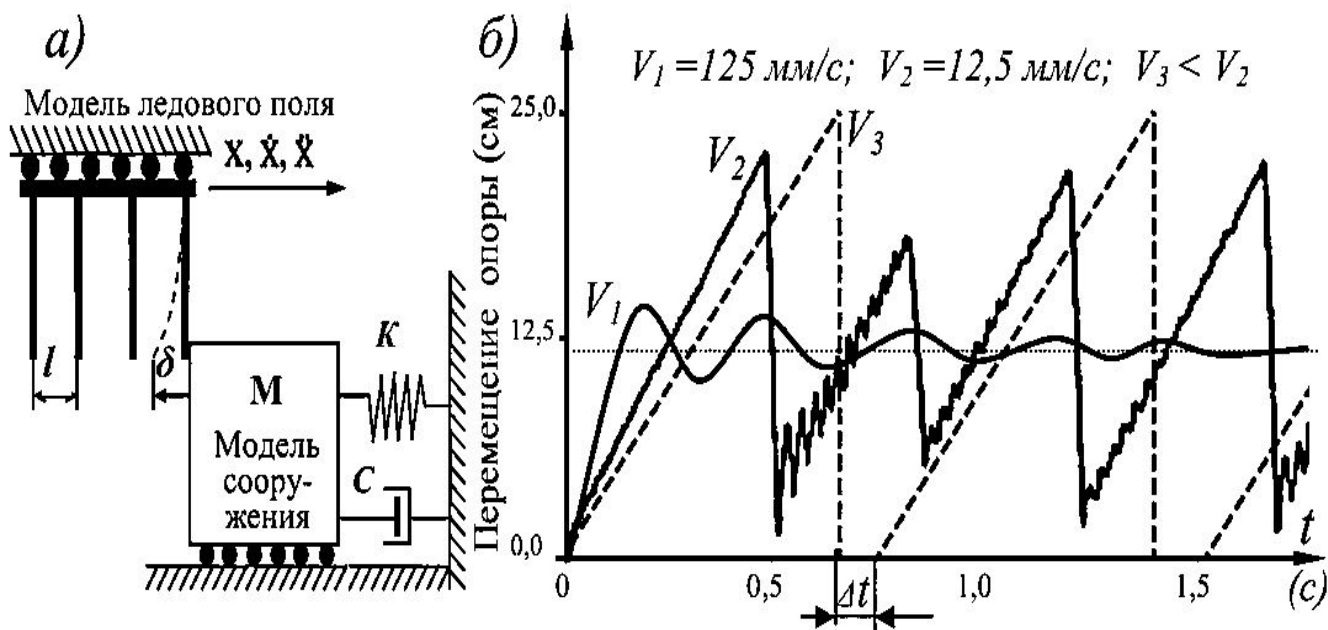
Позицию Sodhi D. разделяют и другие исследователи. С одной стороны, результаты экспериментов ряда авторов указывают на не существенное увеличение прочности льда с ростом скорости его нагружения [217,235,285,380], с другой — на зависимость частоты разрушения льда от скорости его деформации в контактной зоне, Так, однозначно установлена зависимость глубины разрушения льда L_{cr} от относительной скорости упругого деформирования кромки льда δ_r , а также связь **энергии деформации льда** не только со скоростью движения ЛП $V_{лп}$ и с глубиной разрушения, льда L_{cr} , но и с его толщиной h [235,241,253,277,300,316,202,342,345,380383]. Результаты приведенных работ в интегральном виде сводятся к тому, что, в любой модели лед всегда имеет свою собственную характеристику разрушения и не связан ни со свойствами сооружения, ни с параметрами его движения. Кроме того, в работе [346], например, абсолютно справедливо отмечено, что «Кривая скорости деформации (или напряжения) при дроблении льда», которую можно рассматривать как базовое предположение модели «отрицательного трения», получена в результате **статического испытания образца льда, и поведение льда в этом испытательном состоянии всегда будет сильно отличаться от того**, что происходит при динамическом взаимодействии льда и структуры в поле».

Выводом по применению моделей данного типа можно считать, что объектом исследования необходимо рассматривать поведение **упруго напряженного объема льда** перед поверхностью внедряющейся опоры сооружения, а **точнее механизм разрушения льда в этом напряженном объеме льда**, расположенном непосредственно у контактной поверхности льда с сооружением.

Вторая концепция базируется на неоднократно подтвержденной гипотезе о том, что причиной возникновения цикличности ледовой нагрузки является именно **механизм разрушения льда**. Источником энергии является кинетическая энергия ЛП, частично диссипируемая в массиве льда в процессе его упругого сжатия и в виде его разрушения. именно такие рассуждения приведены в процитированной выше работе [346] D. Sodhi по результатам его экспериментов в ледовом бассейне.

Впервые механическая модель взаимодействия ЛП с МЛС в 1971 г. была предложена Matlock и др. [293]. В этой модели ледовое поле движется со скоростью $V_{лп}$ в сторону одномассовой модели сооружения (M) снабженной элементами упругости (K) и демпфирования (C). Ледовое поле представлено в виде простой рейки с консольными

упругими стержнями-зубьями, расположенными на фиксированном расстоянии. Механический аналог этой известной модели приведен на Рисунке 5.2.7,а.



- Рисунок 5.2.6 Модель взаимодействия ЛП–МЛС по Matlock et al. [293]: а) – физико – механическая схема; б) – возможные варианты процессов разрушения льда в зависимости от скорости дрейфа ЛП

Эта модель дает возможность получения «пилообразной» нагрузки на сооружение, потому что разрушение зубьев происходит периодически и только при наступлении критических деформаций δ_{cr} . Значение δ_{cr} зависит от прочностных и упругих свойств льда, которые могут моделироваться толщиной и высотой зубьев. Уравнение движения для этой модели [293] имеет вид :

$$\begin{cases} M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = Q = (\delta / \delta_{\max}) Q_{\max} \\ \delta = ut - x - (N-1)p \end{cases} \quad (1)$$

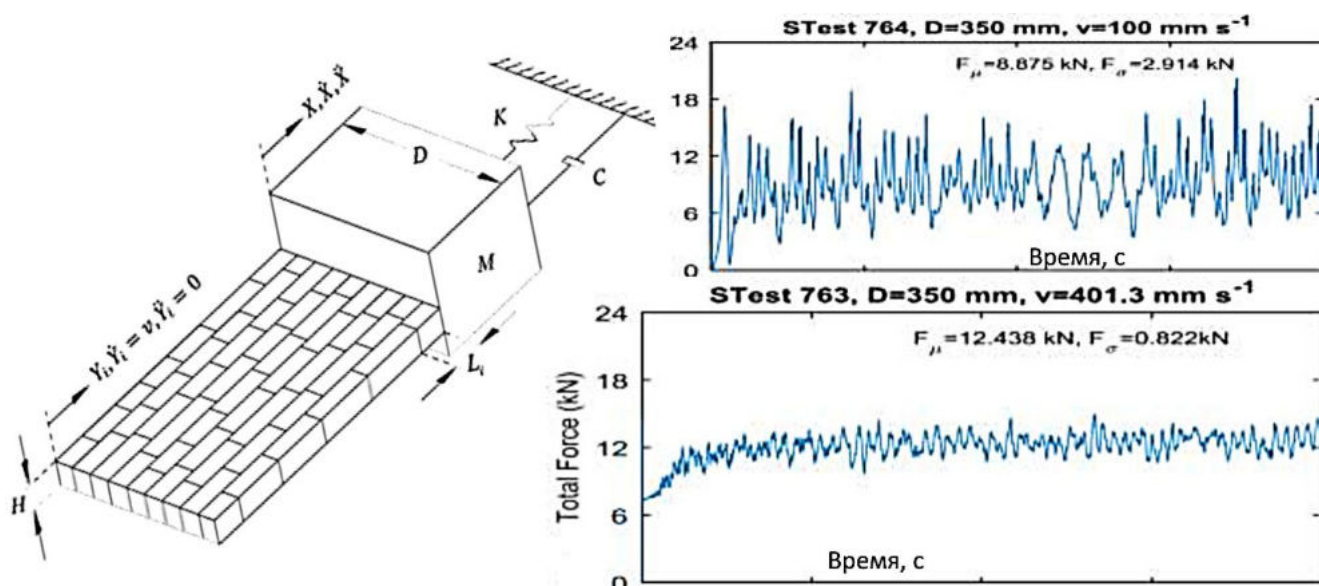
Модель Matlock и др. [293], достаточно хорошо описывает колебания опоры, близкие к релаксационным. Но, как упоминали сами авторы модели, резонанса нет, потому что отсутствует периодическая функция силы-времени. Более того, лед сопротивляется синхронизации или перемещению между структурой и льдом, когда конструкция движется назад от максимального смещения. Вариациями параметров на этой модели можно получить различный характер (тип) разрушения льда, который может изменяться от вязко–пластичного до хрупкого. Для двух скоростей V_1 и V_2 на рисунке 5.2.7,б показаны численные примеры из работы [293]. Многие современные авторы применяют и совершенствуют эту модель для демонстрации своих гипотез [226,254,234,235,233,295, 380].

Но, как отмечается в ряде работ, например в [380], в модели Matlock и др. [293] проблема того, как объективно получить надлежащую длину дробления, которая может определять период взаимодействия силы с соответствующей скоростью льда, все еще остается нерешенной и сделать это перспектив пока не представляется. Поэтому *эта концепция для прогнозирования параметров циклических ледовых нагрузок на данном этапе ее разработки не применима.*

Смешанная схема моделирования процесса возникновения автоколебаний в системе ЛП – МЛС представляет для решения рассматриваемой в данной работе проблемы наибольший интерес. К работам, выполненным с комплексным подходом, можно отнести работы, в которых применяется вместо модели «отрицательного трения», где при снижении относительной скорости льда и сооружения давление на лед растет и от этого он разрушается, предлагается использовать специально разработанную модель «генератора колебаний». Одной из первых здесь являются работы соавторов Xu J. и Wang L. [380], где рассматривается модель генератора ледовой силы, в которой "генератор" или динамическая сила льда рассматривается как независимая динамическая система, включающая как периодическую, так и самовозбуждающуюся природу» и это важно, т.к. другие периодические сигналы не поступают извне интегральной системы лед – сооружение. Авторы считают, что независимый от системы ЛП – МЛС генератор лучше отражает физическое происхождение явления колебаний в ней, они обосновали свою модель тщательным анализом процесса разрушения льда с точки зрения *затрат энергии на разрушение льда в ее общем энергетическом балансе* в рассматриваемом процессе функционирования системы ЛП – МЛС.

С точки зрения комплексного учета многих факторов, влияющих на процесс возникновения автоколебаний в системе ЛП – МЛС, в том числе факторов от механизма разрушения льда, интерес также представляют, работы Ji и Oterkus [254,234,235,233], выполненные на основе новой комбинации физических механизмов между самовозбуждающейся вибрацией и принудительной вибрацией. Этими авторами разработана новая динамическая модель взаимодействия массива льда в ЛП с сооружением, принятом как осциллятор с одной степенью свободы. В работе [235] ими предложена новая комбинация физических механизмов между самовозбуждающейся вибрацией и вынужденной вибрацией и рассмотрено влияние кривой «скорость напряжения-деформации льда» и «длины разрушения» льда. Для моделирования случайной природы сил разрушения льда применено уравнение Ван-дер-Поля, которое является моделью осциллятора с нелинейным демпфированием для описания характеристики колебаний силы льда пилообразного вида. В сочетании с *моделью отрицательного трения* в качестве исходных параметров расчета использованы длина (глубина) разрушения ЛП, объединенная вместе с его скоростью.

В численном эксперименте в процессе взаимодействия льда с сооружением были зафиксированы три различные реакции сооружения на ледовую нагрузку: *квазистатические, стационарные и случайные режимы*. Также в разработанной численной модели наблюдается явление блокировки частоты силы льда во время вибраций, вызванных льдом спонтанными разрушениями льда, для чего, собственно, и разрабатываются такие модели. Полученные исследователями результаты хорошо согласуются с результатами полномасштабных и маломасштабных физических экспериментов, а также с результатами других численных моделей, как модели Matlock и др. [293] и Huang и др. [226], включая взаимосвязь скорости движения сооружения со скоростью льда, силой льда и профилем отклонения сооружения для трех различных режимов от низких до высоких.



- Рисунок 5.2.7 Модель неодновременного разрушения ледового поля на контакте с опорой сооружения разработанная Ji и Oterkus в [254] и сравнение полученных ее решением, совпадающие с данными двух опытов по Sodhi [343]

В продолжение их предшествующих разработок, в исследовании [254] X. Ji с соавторами представили расширение модели, но здесь *задача уже приближена к реальной*: выполнено моделирование **неодновременного разрушения льда** на контакте по принципу модели Matlock и др. [293]. Для моделирования **неодновременного разрушения** льда (Рисунок 5.2.7) при воздействии ЛП на МЛС, предложена концепция **множественных зон (полос) разрушения** льда для обеспечения характеристик **неодновременного разрушения** ледовых блоков – элементов в каждой из нескольких полос.

Каждая зона разрушения льда в каждый момент времени создает локальную силу воздействия на конструкцию, которая определяется произведением площади сечения блока на предельное напряжение, которое, как и длина блока, задаются случайным образом в уравнении генератора Ван дер Поля в заданных оператором пределах по «стандартной» нормативной формуле [104]. *Локальная сила* давления льда просуммированная

в каждый момент времени по всем блокам льда, попавшим в этот момент, на определенном интервале процесса имеет **стохастический характер**, поэтому, воздействуя на конструкцию, заставляет ее вибрировать как осциллятор с одной степенью свободы, что повышает адекватность этой модели реальному процессу контактного разрушения льда.

Численные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными в Sodhi [343] и указывают на то, что колебания силы льда уменьшаются с увеличением скорости льда и увеличением ширины конструкции соответственно. При более низкой скорости льда происходит одновременное разрушение всех сегментов, что указывает на большой размер зоны разрушения льда в режиме разрушения при пластичном изгибе. При более высокой скорости льда на разных сегментах возникает больше случайных пиковых усилий, что указывает на большее количество одновременных разрушений льда в меньших зонах хрупкого дробления. Очень важно, что результаты моделирования серии из 134 «слепых» тестов продемонстрировали способность этой модели [254] прогнозировать ледовую нагрузку при различных скоростях льда, ширине конструкции и толщине льда. Кроме того, данные экспериментов по прорезанию ледовой плиты показали, что среднее и минимальное эффективное давление льда имеют приблизительно линейную зависимость от скорости ЛП, **что подтверждает предположение о вариациях зоны разрушения льда в модели**. Все приведенные выводы говорят о том, что эта модель весьма перспективна для использования в разработке расчетной модели ледовой нагрузки, адекватно реальному процессу.

Наибольший интерес для решения рассматриваемой здесь задачи представляет модель Wu T., Qiu W. [377], в которой авторы модели достигли практически полной независимости каждого участка нагружаемого объема льда в зоне контакта от влияния на его деформативно-прочностные свойства соседних участков-блоков-стержней. На рисунке 5.2.893 показана графическая интерпретация модели этих авторов, которая отражает ее суть.

Предложенный в этой работе метод учитывает как пространственную, так и временную корреляцию между частными местными давлениями льда на контакте с каждым элементом модели. То есть, данная модель является универсальным инструментом для рассмотрения несимметричных характеристик локального давления льда при оценке общей силы льда.

Интегральная стохастическая функция ледовой нагрузки в этой работе [377], также, как в ранее рассмотренной [254] определяется процессом суммирования сил давления льда, рассчитанных для каждого элемента с учетом цилиндрической поверхности опоры сооружения. Авторы этой модели верифицировали ее работу по опубликованным в [200, 232] данным, определенных по показаниям тензометрических панелей, расположенных на «рабочих поверхностях» маяка Norströms-ground, установленного в Финском

заливе, а также на стене кессона буровой платформы Molikpaq в период ее работы в море Боффорта – по значениям двух параметров: значениям контактной ледовых сил и частоте их пиков. В таблице 5.2.1 приводятся параметры для сравнения (через дробь): измеренные в натуре и рассчитанные по модели.



- Рисунок 5.2.8 Схема модели разрушения льда на цилиндрической опоре по [377]

Таблица 5.2.1. Сравнение основных расчетных параметров модель / натура в [377]

Параметры сравнения	Molikpaq	Norströms -ground
Ширина контакта (м)	80	7,5
Толщина льда (м)	2,4	0,7
Скорость ЛП (м/с)	0,01	0,06
Масса МЛС (т)	160000	11700
Контактная сила (МН)	245,5/ 262,3	1,054/ 1,124
Частота (Гц)	1,26/1,26	2,64/2,64

Сравнение верифицируемых параметров с полученными в натурных измерениях показывает из удовлетворительное согласование.

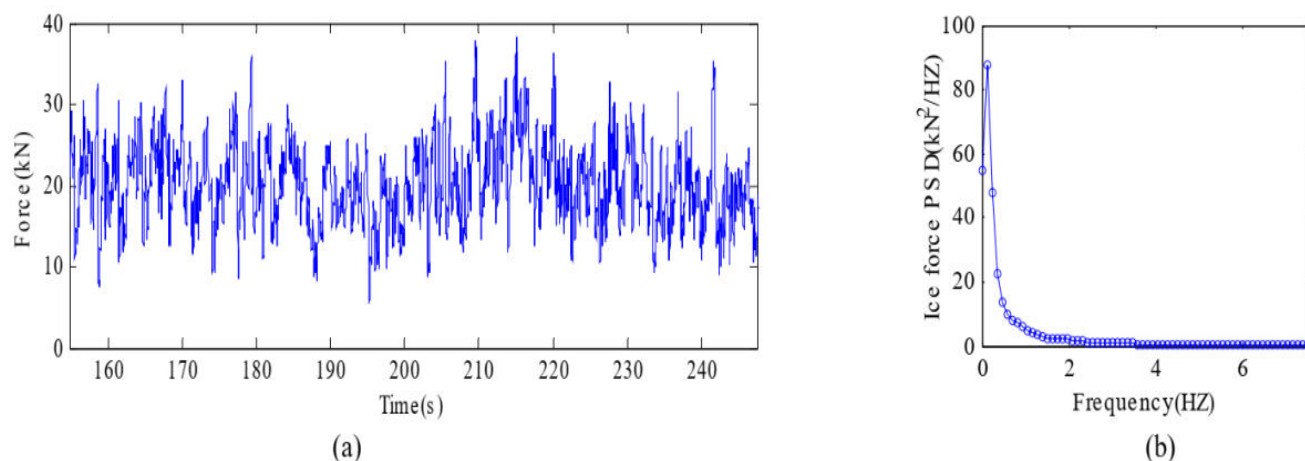
Разработке численных моделей, базирующихся на физических экспериментах и натурных измерениях посвящены также работы [219,224,305,376,377,383], их общая направленность – **«подбор» таких исходных параметров** для внесения их в численный код, **которые внесут в результат численного счета изменения в сторону его наибольшего приближения или совпадения с физическими характеристиками ледовой нагрузки, записанными на натурном сооружении или в модельном физическом эксперименте.**

Методология спектрального анализа стационарного стохастического процесса генерации самовозбуждающихся или вынужденных колебаний МЛС под воздействием циклических сил, порождаемых разрушением льда на контакте, с учетом временной и пространственной корреляции между локальными ледовыми силами и откликом сооружения применена в ряде исследовательских работ [179,252,246,248,249,250,324,376,379] и др. Первично, *как метод анализа спектра отклика сооружения* на возбуждение его колебаний под воздействием ледовых сил эта методология в рассматриваемой области была предложена в работах D.V.Reddy и др. [324]. В большинстве других работ это направление рассматривалось практически с той же целью, основное внимание уделялось подбору исходных параметров для предлагаемых моделей, с тем, чтобы их реализация как можно точнее соответствовала записям колебаний натуральных сооружений – маяков в финском заливе и решетчатых платформ в Бохайском море.

Наиболее полное представление о методе спектрального анализа, использующегося для полного динамического анализа подвижных МЛС с обзором работ по данной теме, дается в современной статье Т. Кärnä и др. (2006) [250]. Здесь коллектив этих авторов даже поставил практическую цель, которую они обозначили в заглавии статьи: разработать «спектральную модель сил, возникающих при дроблении льда». В качестве основания для разработки их спектральной модели, применимой как к узким, так и к широким сооружениям, эти *авторы приняли гипотезу*, согласно которой эффектом отклика сооружения на воздействие льда можно пренебречь при условии, если скорость ЛП находится в диапазоне от средней до высокой и если динамические отклонения конструкции сооружения по ватерлинии составляют лишь малую долю толщины ЛП, то есть, могут рассматриваться неподвижными.

Свою гипотезу Т. Кärnä с соавторами [250] обосновали результатами их прямых полномасштабных цифровых измерений контактной силы ледового давления на два морских сооружения: на маяк Norströmsgrund в Финском заливе зимой 1999 и 2000 годов и на швартовном столбе JZ9-3 MDP2 в Бохайском море зимой 2001 г. (Рисунок 5.2.9).

В обоих случаях опорные конструкции этих сооружений были инструментированы навесными тензометрическими панелями, обеспечивающими цифровую регистрацию контактных давлений. Анализ временного цифрового ряда отклика швартового столба в Бохайском море (Рисунок 5.1.6,а) показал, что при непрерывном дроблении льда, воздействующего на МЛС, суммарная сила ледового давления на опору всегда имеет значение больше нуля, хотя некоторые локальные силы могут периодически снижаться до нуля. При этом средний уровень силы часто остается почти постоянным в течение десятков минут. На рисунке 5.1.6 (б) в работе представлена типичная безразмерная *функция авто-спектральной плотности мощности глобальной ледовой силы*, полученная в этой работе [250].



- Рисунок 5.2.9 Цифровой временной ряд силы локального давления ровного льда при его непрерывном дроблении (а) на сенсорную панель на поверхности опоры и соответствующая функция (б) автоспектральной плотности этого сигнала по [250]

Особенность этой зависимости в том, что она имеет наибольшие значения на низкой частоте и плавно затухает при увеличении частоты и на собственных частотах сооружения не видно пиков. Авторы этой работы обоснованно показали, что эта особенность характерна для всех записей сил на других сооружениях, где непрерывное дробление льда не приводило к самовозбуждающейся вибрации у сооружения. Поэтому авторы работы [250] при анализе спектра ледовых сил выбрали метод, широко используемый при сейсмическом анализе сооружений. Этот метод учитывает основные динамические особенности возбуждения и ответную реакцию сооружения на динамическую нагрузку, поэтому он может быть определен как для стационарного, так и для нестационарного процесса возбуждения колебаний в сооружении.

5.2.3 Результаты анализа современных исследований по выбору факторов, необходимых к учету в разрабатываемой модели, как определяющих тип и параметры цикла разрушения льда

Из «специального дополнительного» обзора концептуальных подходов к исследованию динамических моделей взаимодействия ЛП с МЛС с учетом явления разрушения льда в их контактной зоне и значимых параметров, как базовых в моделях с такими подходами, для выбора *прототипа формируемой расчетной динамической модели энергетического типа* по определению расчетных параметров динамической ледовой нагрузки на вертикальное МГТС, надо отметить *ряд приведенных ниже определяющих моментов*.

Проведенный анализ работ в области рассматриваемой проблемы показывает, что многие современные исследования направлены на разработку некоторой «универсальной» *методологии составления расчетной модели циклической ледовой нагрузки* на МЛС, вызывающей его колебания и возможный резонанс с циклами разрушения льда. С этой целью многие работы посвящены выявлению необходимого и достаточного набора основных, наиболее значимых расчетных параметров, «регулирующих» механизм явления разрушения морского льда в зоне его контакта с вертикальным сооружением и «подбору» значений таких параметров, *построения на этой основе механических моделей, их феноменологический математических описаний и численных реализаций таких моделей* с исследованием моделируемого процесса колебаний сооружения с подбором значений параметров, выбранных в качестве исходных для получения **максимальной «сходимости» результатов расчетов модели и эксперимента.**

Здесь следует отметить важную деталь: имеющиеся в арсенале исследователей и проектировщиков записи (осциллограммы) давления ледового поля на поверхность (измерительную панель) реального сооружения *не являются законами вынуждающих сил ледового давления* на сооружение. Это есть результат взаимодействия ЛП с МЛС, то есть результат решения уравнения (5.2). Из этого следует, что, учитывая физико-математические особенности рассматриваемого динамического процесса, прямое использование параметров цикличности $P_{\max}$ и f_{ice} осциллограммы контактной силы ледового давления, инструментально зарегистрированной на сооружении, *не корректно.*

Поэтому, такой подход не *приведет к решению поставленной в качестве цели данного исследования задачи*, поскольку ее цель – *разработать методологию получения параметров циклической ледовой нагрузки* для использования их в динамическом расчете сооружения, то есть, в первую очередь, **создать расчетную модель ледовой нагрузки**, адекватную всем реальным процессам, формирующим в совокупности процесс циклического разрушения льда на опоре сооружения.

Практически общим местом в большинстве исследований моделей многие авторы, чтобы смоделировать (предсказать) правильный результат, в уравнении вынужденных колебаний сооружения под действием ледовой нагрузки (5.2) применяют *приближенный эквивалентный вынуждающий член*, который отличает каждую численную модель друг от друга. Обоснованно представляется, что *различные механизмы разрушения льда вызывают различные отличительные свойства в записи формулы возбуждающей силы* либо по частоте, либо по амплитуде при разных скоростях. В основном, *в качестве функции, описывающей пилообразное изменение силы давления льда*, вызывающе осциллирование одномассовой модели сооружения, авторами использовались модели, основанные на:

– кривой зависимости прочности льда от скорости нагружения образцов при их испытании на прессе на сжатие – модель «отрицательного трения»;

- «характерной» длины разрушения льда перед внедряющейся опорой сооружения;
- генератора импульсов как стохастически возникающих сколов льда на контакте;
- генераторе динамической силы льда – как вибрация связи между двумя элементами системы ЛП – МЛС;
- функции изменения ледовой нагрузки, комбинирующей одномерный генератор импульсов и неодновременное упругое разрушение структурных самостоятельных элементов в массиве льда;

Следует отметить, что, наряду с широко применяемым традиционным силовым подходом к составлению уравнений вынужденных или самовозбуждаемых в системе ЛП – МЛС колебаний, выполнялся ряд исследований с использованием энергетического подхода. В качестве обоснованности применения *энергетического подхода к формированию новой энергетической динамической модели циклического разрушения льда* для получения расчетных параметров для динамического расчета МЛС *рассматривавшегося автором ранее* [363,364,122,128,129] *и предлагаемого в данном исследовании* следует сослаться на работы ряда авторов, которые в их исследованиях [279,342,346,345,380], предприняли попытки *анализа энергетического баланса в системе* взаимодействующих ЛП с МЛС с отображением в нем энергетических процессов разрушения льда. Например, М. Määttänen в работе [280], рассматривая энергетический баланс показывает, что тип разрушения льда в каждый момент времени и в каждом сечении его напряженного объема определяется «самостоятельно» – исходя из *принципа наименьшей диссипации энергии*.

Очень важной *с точки зрения энергетического подхода* к описанию процесса взаимодействия ЛП с МЛС является теоретическая работа Wang L. и Xu J. [380], в которой авторы представили аналоговую «модель генератора ледовой силы», основанной на *механизме циклического преобразования части кинетической энергии* ледового поля в потенциальную *энергию упруго деформируемого объема* льда с параллельными процессами *потерь ее части на тепло, энтропию, на работу по отклонению опоры сооружения и на резкое развитие микротрещин в этом объеме*, превращающее упругую энергию в *поверхностную энергию продуктов разрушения* льда (энергию его потенциального состояния). Уравнение генератора силы льда авторы [380] описывают в форме динамического равновесия *скоростей изменения (мощностей)* упомянутых выше компонентов энергии (скорости рассеивания тепла и увеличения энтропии рассматриваются как неизменные). Авторы в этой работе полагают, что «может быть введен всеобъемлющий термин связи для корреляции *энергии предельной деформации* во льду *с относительной скоростью между льдом и конструкцией*» как « – *безразмерный коэффициент динамической силы льда*», который соотносится с прочностью льда на одноосное сжатие в диапазоне хрупкости. При этом, «для жесткой конструкции амплитуда силы льда зависит только от начальные условия вообще без самовозбуждения».

Энергетический анализ процессов разрушения льда и колебаний «сооружений» по прорезанию моделями опор модельного льда также был выполнен D. Sodhi и K. Morris, результаты их экспериментальных исследований представлены в работах [342,346,345]. В своей работе [342] эти авторы провели очень тщательно подготовленные эксперименты в «замкнутой» механической системе, где контролировались все факторы и проводились тщательные измерения изменений **значений энергии** и всех величин, которые могли оказывать влияние на параметры взаимодействия модели ЛП и индентора.

Как результат экспериментов, описанных в работе [346], D. Sodhi сделал такие же важные выводы, как и Wang L. и Xu J. [380], в т.ч. такой: **«накопленная во льду и сооружении энергия высвобождается** позже, уже после разрушения льда, и тогда лед снова способен двигаться при пониженных уровнях силы, его **энергия затрачивается на работу**, по выдавливанию продуктов льда...».... **«разбаланс между мощностью работы до разрушения и после него**, приводит к вибрациям модели, вызванным разрушением льда. Во время установившихся процессов непрерывной ползучести и мелкого дробления **скорость притока энергии (мощность – авт.), равна мощности энергии, рассеиваемой во льду**, что приводит к отсутствию вибраций конструкции».

Постановка исследований разрушения модельного льда при прорезании моделью опоры искусственного льда в ледовом бассейне, в частности, **метод определения удельной энергии разрушения льда**, показанный D. Sodhi и K. Morris, и численные результаты этого параметра, опубликованные в их статьях [342,345], являются **наиболее близкими по методологии, разрабатываемой в настоящем исследовании**, они могут послужить для косвенной верификации полученных здесь результатов.

Но **наиболее важным наблюдением**, которое вытекает из результатов исследований прямого измерения силы на реальных сооружениях, описанных Т. Kärnä и др. (2006) в [250], является вывод о том, что **можно пренебречь эффектом влияния на изменения возбуждающей колебания сооружения силы**, если скорость льда имеет значения от умеренной до высокой и при незначимом по сравнению с толщиной льда значении отклонения сооружения от действия этой силы. Многие оффшорные структуры работают в таких условиях.

Общий вывод выполненного анализа – не смотря на очевидный прогресс в разработке **расчетных моделей ледовых нагрузок**, воздействующих на МЛС, включая **модели разрушения льда**, прогресс в расчетах сооружений с применением численных методов, а также прогресс в методах инструментального измерения ледового давления на поверхности уже построенных и эксплуатируемых ледостойких гидротехнических сооружений, проблема определения **достоверных значений расчетных параметров цикличности ледовой нагрузки на стадии проектирования, как цельная методология, до настоящего времени не ставилась и в настоящее время остается нерешенной.**

5.3 Синтез новой имитационной энергетической модели циклической ледовой нагрузки на МЛС на базе результатов экспериментов автора

Выполненный краткий «специфически узконаправленный» обзор современных моделей имел единственную цель, обозначенную в начале этой главы: найти разработанные и численно апробированные характерные элементы расчетных моделей ледовых нагрузок, адекватные реальным процессам формирования динамической ледовой нагрузки на МЛС для их доработки и включения в разрабатываемую энергетическую динамическую модель ледовой нагрузки на МЛС.

Основными элементами, которые следует применить в разрабатываемой динамической модели в рамках энергетической концепции разрушения льда, с учетом результатов анализа современных исследований и требований нормативных документов, являются:

- *формирующий циклический характер ледовой нагрузки механизм динамического разрушения морского льда* в зоне контакта ЛП с МЛС, учитывающий его строение и физическое состояние, а также форму опоры МЛС и скорость движения ЛП;
- *имитационная модель* механизма разрушения морского льда - как комплекса различных видов разрушения в механизме контактного разрушения кромки ЛП, описываемых одним «универсальным» критерием разрушения с учетом строения и физического состояния льда и влияния на процесс его контактного разрушения факторов внешней среды и параметров задачи;
- *энергетический критерий* механического разрушения льда $\mathcal{E}_{cr}$, интегрально учитывающий затраты энергии на работу всех видов разрушения льда и выполняющий «управляющую» роль в функционировании комплексного процесса разрушения льда в предложенной модели расчета циклической ледовой нагрузки на МЛС;
- *закон изменения нагрузки* по времени или частоты... или спектральные характеристики (энергетический спектр...)⁹: аналитическая или цифровая запись возбуждающего силового воздействия льда на морское ледостойкое сооружение, которая дает возможность статистической обработки для определения среднего значения контактной силы, как случайной величины; среднеквадратичного отклонения расчетной силы от среднего значения; частоты циклов непрерывного сигнала контактной силы льда.

Таким образом, – в рамках выбранного *энергетического подхода с конкретным*

⁹ Согласно требованиям Международного стандарта ГОСТ 27751-2014

механизмом разрушения льда и критерием его разрушения необходимо сформировать феноменологическую модель расчета параметров циклических ледовых нагрузок на МЛС для выполнения его динамического расчета и учитывающую такие параметры, которые однозначно согласуется с большинством современных феноменологических теоретических моделей, их численных реализаций, экспериментальных модельных и полномасштабных наблюдений, доступных в литературе, с последующей ее верификацией.

5.3.1 Выбор базовых механизмов циклического разрушения льда для формирования феноменологической имитационной модели

Начало деформирования участка ЛП, наваливающегося на цилиндрическую поверхность опоры МЛС характеризуется процессом накопления упругой энергии в прилегающем к зоне контакта массива льда. Этот процесс имеет *комплексный характер*: на фоне *общего роста запаса упругой энергии* наблюдаются скачки её рассеяния за счёт *сколов больших и малых клиновидных блоков неразрушенного льда* в стороны свободных нижней и верхней поверхностей ледовой плиты (Рисунок 2.Х.Х), а также за счет образования и развития ряда *радиальных и горизонтальных трещин* в активной зоне массива ледяного поля (Рисунок 5.1.3-б). Часть трещин, образовавшихся ранее, продолжает развиваться в глубину массива льда за счёт передачи энергии к их устьям; другая часть трещин останавливается в своём развитии после встречи с полостями или другими трещинами; ещё часть новых трещин образуется, начиная рост от точек предельной концентрации напряжений на границах кристаллов кристаллизовавшихся солей или инородных включений. Учитывая объёмный характер явления, следует отметить, что *трещины развиваются во всех радиальных плоскостях*, а между трещинами находятся *объёмы неразрушенного льда, они имеют вид брусков*, вытянутых по радиусам к центру всесторонне сжатого объёма продуктов разрушения льда в предшествующем цикле разрушения (Рисунок 5.1.3).

На этом первый этап процесса разрушения «условно» заканчивается потому что, на самом деле он развивается, в том числе и в других механизмах разрушения, потому что запас кинетической энергии плиты на много порядков превышает работу разрушения льда на контакте. Продукты разрушения массива льда на этом этапе – крупные и средние обломки: «боковые клинья», блоки, крупные осколки льда и «длинные трапециевидные бруски» льда в средней части ледовой плиты. Следует констатировать факт: в момент первичного нагружения ровной поверхности торцевой грани ЛП будет иметь место

наибольшее значение контактной силы, поскольку нагрузке подвергается «целик» льда — относительно цельный массив с небольшим количеством трещин и максимальной площадью контакта. Это отмечалось многими авторами в их работах.

А. Механизм разрушения льда свободным сколом. Среди многообразных механизмов разрушения льда при его воздействии на конструкции вертикального профиля наиболее часто отмечается *разрушение льда путем сдвига* некоторых объемов разного размера. Этому типу разрушения ЛП на его контакте с МЛС посвящен раздел в обзоре работ, выполненном автором во второй главе, а также в работе [127], где отмечаются существенные особенности этого процесса. Сдвиговое разрушение в напряженном объеме льда на кромке ЛП, контактирующего с сооружением, является одним из типичных (часто — первоначальным) механизмом *сброса (выхода) упругой энергии на свободные поверхности новых трещин*.

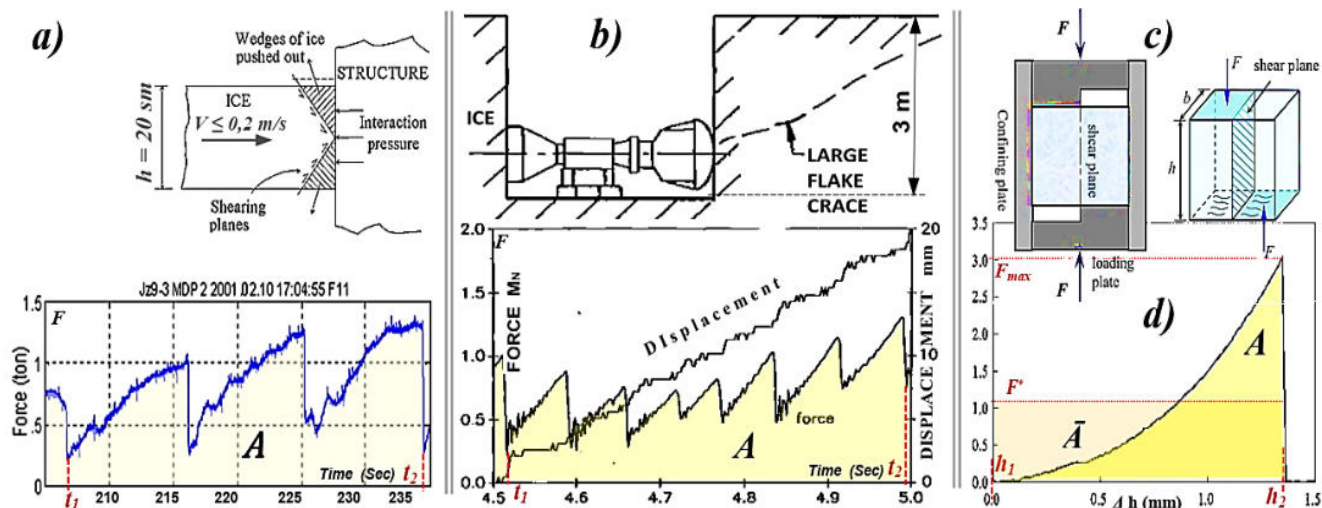


Рисунок 5.3. 1 Циклическое высвобождение упругой энергии сжатого объема льда путем скалывания его отдельных объемов в зоне контакта в различных условиях нагрузки: а) — при прорезании ледового поля сооружением по Yue et al. [385]; б) — скол блока в массиве льда по Frederking et al. [198]; в) — запись силы разрушения образца морского льда сдвигом по Ji et al. [250]

В некоторых работах [244,357,345,177,201,271,198,] проявлением именно этого механизма их авторы обоснованно объясняют «пилообразный» характер записи контактной силы во времени или по длине участка разрушенного льда, потому что именно сколы (как показано и в данной работе в главе 5) инициируют *резкие локальные разрушения*, что приводит к потере значительной контактной площади. Это в разных масштабах экспериментов показано на Рисунке 5.3.1, включая как постановочные опыты в натурном леднике, в лаборатории, так и запись реальной ледовой нагрузки на действующем МЛС.

Важность поиска формулы – модели описания такой ледовой нагрузки на сооружение для возможности ее прогнозирования стимулировала разработку ряда экспериментально – теоретических «сдвиговых» моделей (Рисунок 5.3.2). Daley C.G. [175], базируясь на экспериментах других авторов [373,236], разработал **вычислительную модель**, которая описывает контактную силу как результат хаотического чередования сколов отдельных макроскопических объемов льда по обе стороны изменяющейся на поверхности жесткого индентора кривой линии контакта между поверхностью и ненарушенным массивом льда, подобно картине разрушения блоков льда в экспериментах [236, взятых им за прототип своей модели.

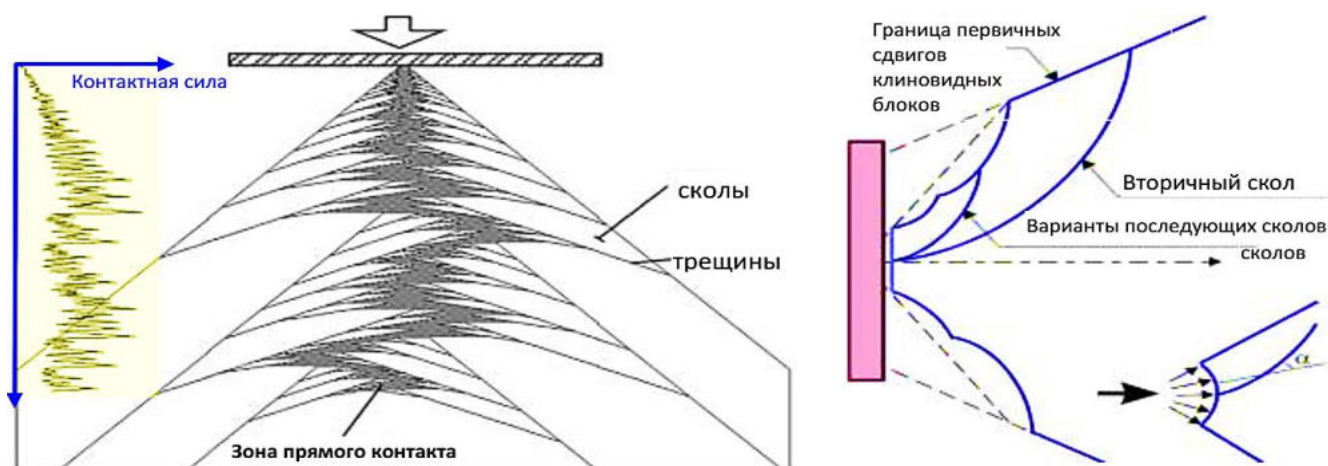


Рисунок 5.3.2 Сдвиговые модели разрушения льда C.G. Daley [175] и P. Kujala [271]

На Рисунке 5.3.2-а показана модель Daley C.G. [175] и генерируемый этой моделью цифровой временной ряд контактной силы. Следующий Рисунок 5.3.2-б демонстрирует разработанную Р. Кужала [271] – модифицированную модель Daley C.G. [175], но построенную с использованием **принципа минимизации энергозатрат** на развитие поверхности трещины.

С учетом результатов многих работ по данной теме, в статье [357] Taylor и Jordaan предложили **вероятностную модель механизма разрушения** кромки ледового поля, базирующаяся на «внешних» и «внутренних» сколах. Авторы этого исследования, как и ряда других, показали, что **скол является очень нерегулярным процессом** и развивается в сжатом объеме льда при раздвижении кончиков трещины, расположенной под определенным углом к направлению сжимающего усилия. В условиях сильного сжатия центральной области массива (образца, плиты льда) эта трещина продольного сдвига искривляется в сторону свободной поверхности (См. Рисунки 5.3.1 и 5.3.2). Кроме того, в той же работе [357], скалыванием блоков льда на контакте объясняется уменьшение реальной толщины льда h до «эффективной» h_1 , (Рисунок 5.3.3), где показаны схемы «полного цикла» чередования сколов с дроблением и экструзией продуктов разрушения льда из

зоны контакта. В работе Taylor и Jordaan [357] вероятностный подход к появлению начального события процесса разрушения торца плиты льда, связан с наличием во льду различных дефектов, от которых и начинает развиваться процесс скалывания одного из участков в контактной зоне льда с поверхностью сооружения.

Результаты, полученные во всех описанных выше исследованиях, служат в качестве возможного объяснения *взаимосвязи между сколом и дроблением*, когда следующие один за другим сколы создают острый клин, торец которого постепенно дробится и сминаясь, создавая условия к выравниванию кромки и получения новых больших сколов. При этом процесс дробления – это также череда мелких сколов как с выходом их на свободные поверхности, так и происходящие в средней части контакта в зонах высокого давления. *Эти чередующиеся и взаимно дополняющие друг друга процессы, собственно, и составляют процесс разрушения льда на контакте с опорой.*

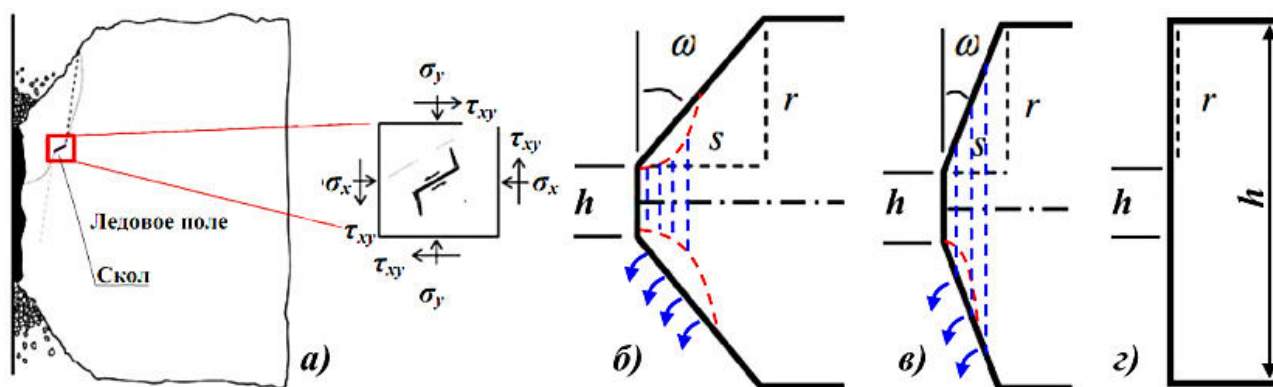


Рисунок 5.3.3 Схема зарождения трещины скола в сжатом объеме в зоне контакта (а) и схема процесса периодической смены прямоугольной кромки ледового поля на клиновидную по Taylor и Jordaan [357] и появления «эффективной» толщины льда: а) – механизм зарождения трещины скола; б, в, г) – процесс выравнивания кромки

Эта часть ледового массива, как показывают результаты экспериментов многих исследователей может разрушаться либо по хрупкому механизму – **дроблением**, либо по вязкому механизму – **смятием**.

Б) Разрушение «среднего блока» дроблением. В настоящей работе процесс деформирования и разрушения напряженного объема «среднего клина» льда между неподвижной поверхностью опоры морского ледостойкого сооружения (МЛС) и не напряженным массивом льда дрейфующего ледового поля (ЛП), расположенном на удалении от контактной зоны, рассматривается как **длинный трапецевидный расширяющийся брус** не определенного поперечного сечения, «дальний» конец которого практически не испытывает влияния давления внешней нагрузки, распределенного по его передней торцевой

границы (Рисунок 5.3.4). Феноменологически, следующий *этап цикла разрушения льда* – *разрушение торцов брусков* средней части плиты, крупных обломков льда, дробление их на отдельные кристаллы и превращение их в мелкие осколки (крошка льда) в процессе продвижения ледяного поля, а также выдавливание части продуктов разрушения из зоны контакта. Этот этап характеризуется *резкими скачками значения контактной силы*, постепенно стабилизирующегося к окончанию этапа.

Продукты разрушения ледяного поля – масса мелко раздробленных обломков льда (ледяная крошка) – мелкодисперсная несвязная среда.

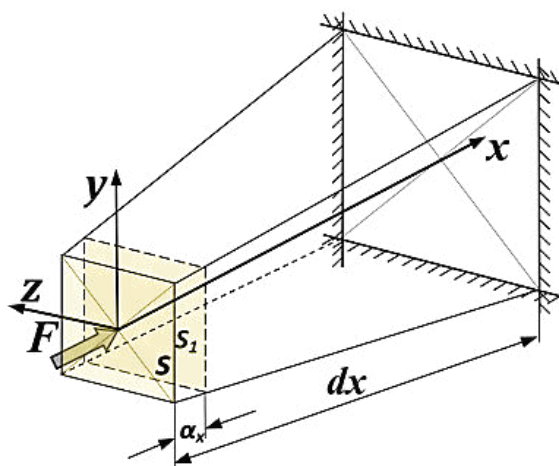


Рисунок 5.3.4 Схематизация расчетного элемента средней части ЛП в виде длинной балки с «заделанным дальним торцом»

Процесс развития трещин и накопления упругой энергии брусками ненарушенного льда, заключённого между ними, заканчивается резким переходом к лавинообразному разрушению сжатых брусков. Механизм разрушения брусков может быть различен, но, в основном, они разрушаются за счёт потери устойчивости по Эйлеру. Это происходит, когда скорость приращения суммы рассеяния энергии за счёт прироста длины множества трещин станет меньше скорости передачи энергии массиву льда на поверхности разрушения.

В) Механизм разрушения льда смятием. Учитывая кристаллическую структуру льда, можно полагать, что слой льда перед внедряющейся жесткой поверхностью разрушается неравномерно по всему его объему, поскольку прочность структуры кристаллов, точнее их сопротивление разрушению – различна для разных направлений приложения нагрузки по отношению к плоскостям их боковых граней (Рисунок 5.3.5). Необходимо отметить, что, в зависимости от *температуры льда и скорости подвижки ЛП*, процесс разрушения кристаллического льда в «среднем клине» может развиваться по двум механизмам: упруго–хрупкому и вязко–пластичному. Возможны и все переходные формы, что еще более существенно снижает возможность *математической записи* этого сложнейшего процесса. Это происходит не только из-за возможной существенной разницы в их поперечных и продольных размерах, но и из-за ориентации их решетки к направлению вектора нагрузки, количества и различного набора дефектов в их структурах, расположения и местоположения размеров ячеек с рассолом на их границах и пр. и пр.

На Рисунке 5.3.5 показана структура столбчатого льда и схема возможных направлений приложения нагрузки к блоку льда в средней части ледовой плиты при различной ориентации граней кристаллов льда к поверхности контактирующего тела. Если предположить, что разрушению в первую очередь подвергнется ряд кристаллов льда, непосредственно контактирующих с поверхностью опоры, то сумма контактных площадей граней или ребер таких кристаллов в первом ряду всегда будет меньше, чем в последующих и тем более, меньше значения площади среднего сечения нагружаемого объема льда, перпендикулярного вектору движения ЛП [10].

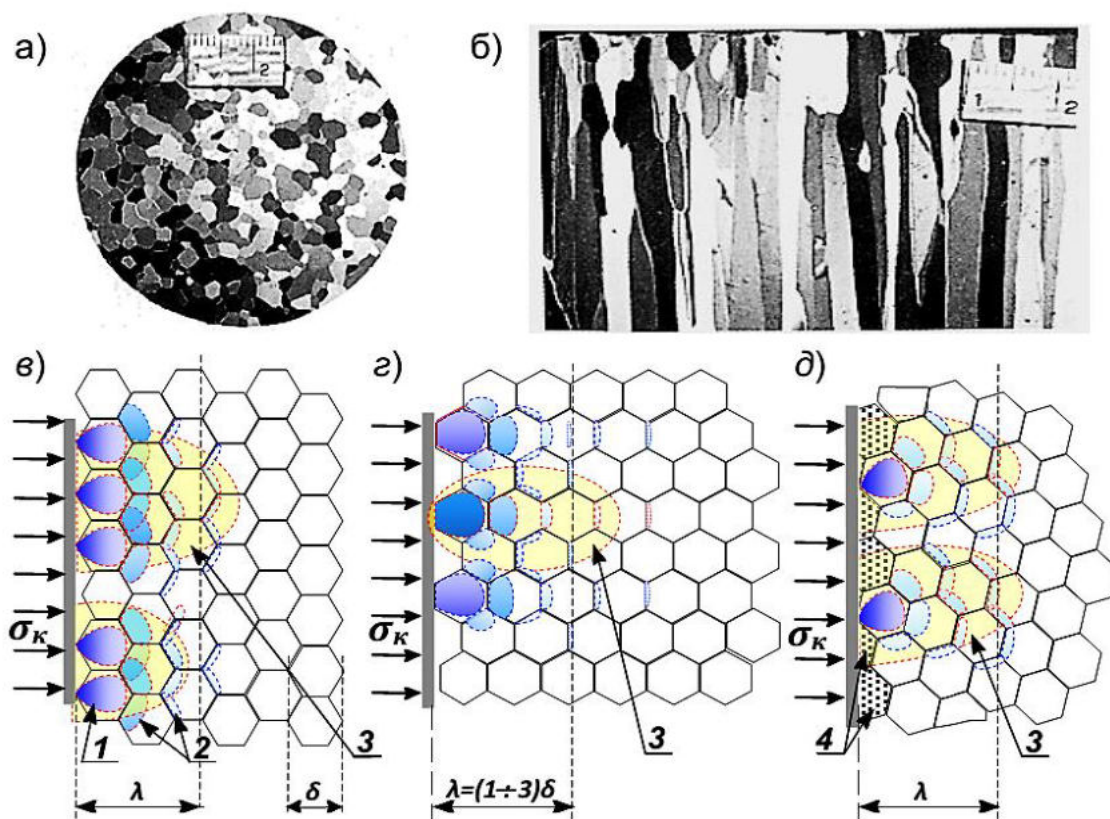
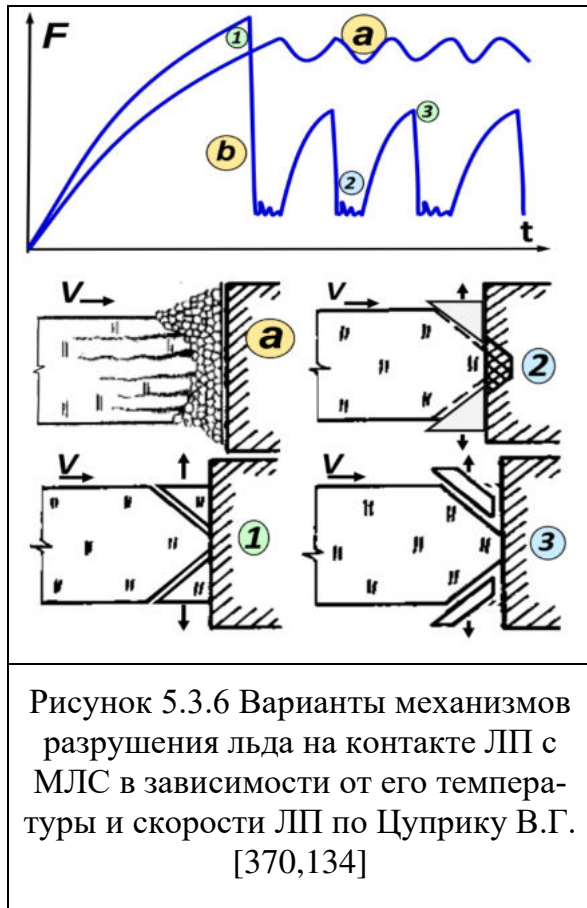


Рисунок 5.3.5 Гипотеза автора о механизме распространения волны напряжения (передачи энергии) в структуре тела из столбчатых кристаллов и послойного контактного разрушения морского льда. Текстура (а) и ориентация кристаллов столбчатого льда (б) (по Dempsey и др.); Распространение волны сжатия во льду (б,в,г) по Цуприк, В.Г.

По мере удаления от площадки контакта энергия удара передается постоянно увеличивающемуся объему льда, ввиду чего с увеличением расстояния от места контакта напряжения сжатия быстро уменьшаются, а значит и приток энергии в каждую условную единицу этого объема существенно уменьшается. На каком-то удалении λ напряжения делают меньше сопротивления льда изменению объема и формы в условиях всестороннего сжатия, они уже не превышают предела упругости льда и деформации остаются

упругими, не вызывающими смятия «кристаллов». Границей (фронтом) разрушения здесь можно считать поверхность разграничивающую массу разрушенных кристаллов и неразрушенных, то есть, *поверхность разрушения* в этом случае – не условная, а реальная, имеющая геометрический смысл *криволинейная поверхность в материальном пространстве - массиве льда*, включающая в себя все пространственные линии, являющиеся фронтами трещин, одновременно развивающихся в этом массиве.



Таким образом, в зависимости от прочности льда, скорости ледового поля и жесткости опоры сооружения могут наблюдаться различные режимы (механизмы) разрушения – как результата высвобождения накопленной упругой энергии в макрообъеме льда: от непрерывного «мягкого» дробления и экструзии смятой массы льда, до характерного хрупкого механизма скалывания блоков льда или чередования сколов с дроблением и экструзией продуктов разрушения льда из зоны контакта [370,134].

Передача энергии сжатия вглубь массива льда продолжится только после того, как продукты разрушения кристаллов предыдущего слоя будут вытеснены из контактной зоны и контакт снова станет жестким, фронт разрушения продвинется вперед на глубину очередного слоя.

5.3.2 Формирование и дескриптивное описание имитационной энергетической модели по результатам экспериментов автора

Основой для выбора схемы расчетной модели разрушения льда нагружаемой грани ледовой плиты послужили результаты исследований автора, представленные в разделе 5.2.1 данной главы и на рисунках 5.3.4 и 5.3.5, а также некоторые проработки других исследователей, представленные на рисунках 5.3.1 – 5.3.3. Кроме того, в качестве основных определяющих положений применяется концепция стохастического процесса (Рисунки 5.2.7; 5.3.2), обусловленного как неодновременностью развития включенных в него процессов разрушения отдельных брусков (балок) при их продольном сжатии (Рисунки 5.2.7; 5.2.8 и 5.3.4), так и сколами отдельных блоков льда (Рисунок 5.3.1 и 5.3.2).

Таким образом, Рисунки 5.2.2 – 5.2.10, а также рисунки раздела 3 содержат все **основные элементы комплексного механизма разрушения льда:** несимметричный сдвиг (скол) блоков льда от центра контакта в стороны свободных нижней и верхней поверхностей; развитие горизонтальных круговых трещин, расщепляющих плиту льда по толщине; развитие магистральных вертикальных радиальных трещин; разрушение продольных консольных балок льда, защемленных в массиве ледовой плиты дальними концами путем сколов рабочих граней; дробление льда в зоне контактной поверхности балок; смятие мелкораздробленного льда в крошку; вытеснение крошки и обломков льда из зоны контакта и пр.

Такой объемный набор концепций, как можно видеть из приведенных здесь материалов исследований автора и других исследователей, на самом деле и составляет в своей совокупности сложное комплексное явление разрушения льда кромки ледового поля на контакте с опорой сооружения. И математическое описание этого явления возможно только с помощью подхода, интегрирующего действия всех факторов через применение единой меры, характеризующей как каждый из частных процессов, так и описывающей весь их комплекс. Такой мерой является энергия, поэтому разрабатываемая в диссертации динамическая модель – энергетическая.

Модель основана на описании комплекса явлений, выявленных в исследованиях автора, и первое дескриптивное качественное описание такой энергетической модели приведено в главе 3, где концептуально показана возможность описания разрушения всего объема льда перед опорой с использованием удельной энергии разрушения его единичного объема (Рисунок 3.4.6). Здесь, основываясь на результатах экспериментальных и теоретических исследований автора (Рисунках 5.2.2 и 5.3.8), ранее «взятая в разработку энергетическая модель получает количественное описание с учетом экспериментально и теоретически выявленных деталей и феноменологических особенностей льда и механики его разрушения.

Поле напряжений сжатия в этой области будет постепенно расширяться, создавая в его границах ***потенциалы упругой энергии во всех элементах структуры льда:*** в межмолекулярных связях кристаллов льда и в дефектах их решетки, увеличивая плотность поверхностной энергии пор и дефектов мезо- и макроуровней. Часть подводимой в эту зону энергии плиты будет диссипировать в виде приращений и слияний микротрещин, ячеек с рассолом, нагревания и фазовых переходов льда в воду и кристаллов солей в рассол, снижая жесткость межкристаллических прослоек и пр. Поэтому рассматриваемую систему ЛП можно считать консервативной, поскольку работа по развитию деформаций, вызывающих разрушение льда в виде развития трещин различной природы, а также изменения объемов и формы кристаллов, производится ***за счет упругой потенциальной энергии*** – параллельно с ее накоплением в структуре льда и в опоре МЛС. Что касается затрат

определенной части кинетической энергии ЛП на выжимание продуктов разрушения льда из зоны контакта, ее следует искать из решения соответствующих задач выжимания тонкого слоя вязкой жидкости [128]. Особенность рассматриваемого ниже решения данной задачи определения ледовой нагрузки в виде глобальной силы F будет состоять в предположении *послойного разрушения льда* в активной напряженной зоне ЛП.

Будем рассматривать поведение льда в объеме, представляющем активную зону его массива в торцевой части ледового поля на глубину x (Рисунок 5.3.9). За границей этой зоны, как описано в работе автора [128] напряженно-деформированное состояние льда в толще плиты считаем «нормальным», т.е. не напряженным усилиями и деформациями, связанными с контактными процессами в активной зоне. В процессе движения ледового поля

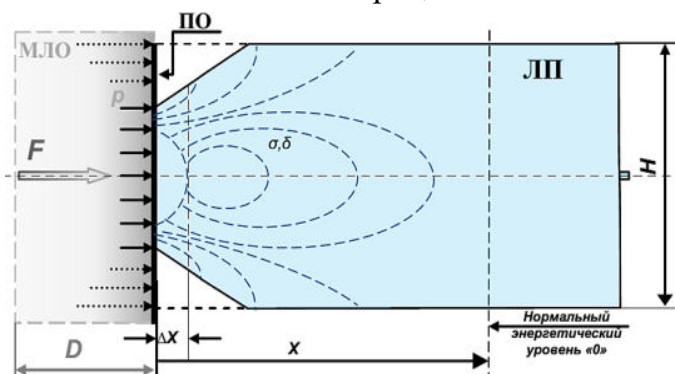


Рисунок 5.3.9 Схема формирования напряженно-деформированного состояния в активной зоне (ЛП) в процессе его прорезания опорой МЛС

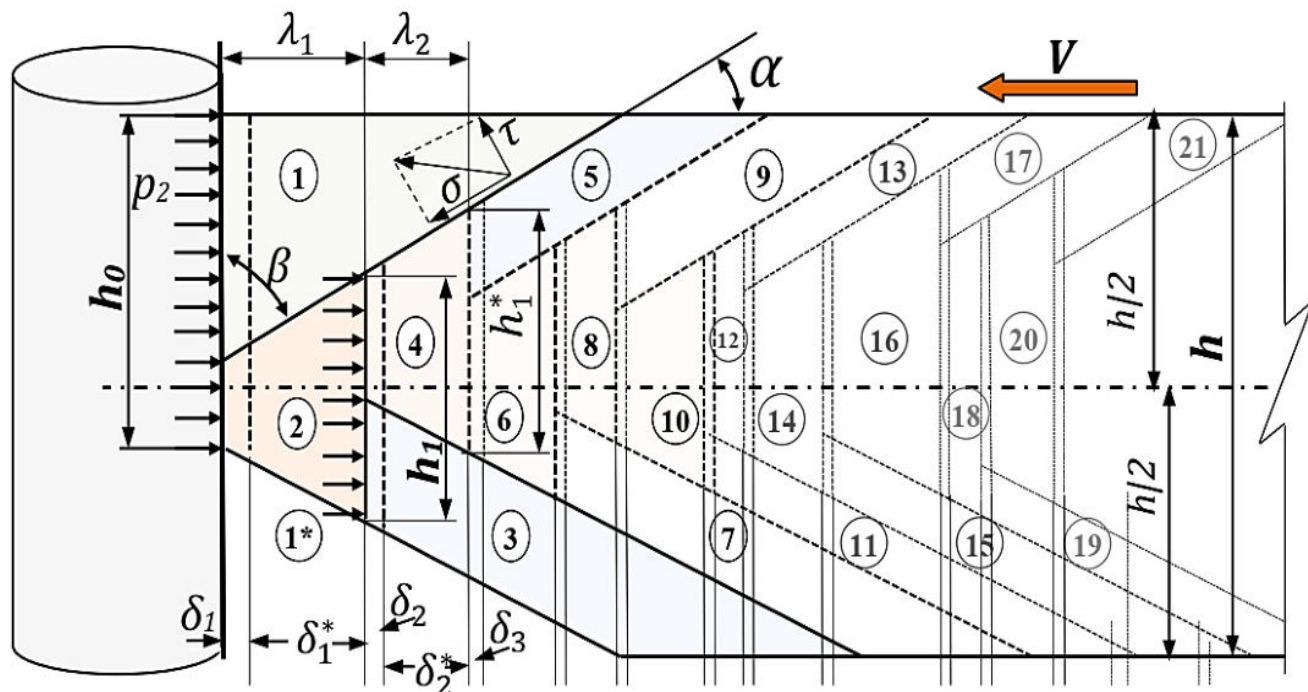
с постоянной скоростью его напряженно-деформированное состояние в контактной зоне будет изменяться за счет аккумуляции поступающей в эту область массива кинетической энергии от движения ледового поля. Наибольшие напряжения, уравнивающие контактные давления, будут концентрироваться в массиве льда, прилегающем к грани опоры.

Здесь в качестве «основного варианта» будет рассматриваться модель несимметричного комплексного разрушения торцевой грани ледового поля (Рисунок 5.3.10), разработанная по результатам теоретических и экспериментальных исследований автора в 1978-1984 г.г. [117,125,140]. В 1992 г.

Исходя из экспериментально установленного факта, свидетельствующего о том, что процесс преобразования кинетической энергии ледяного поля в энергию разрушения льда (в энергию образования новых поверхностей) имеет циклический характер [139,138,135,], правомерно считать, что для описания условно-непрерывного процесса внедрения, достаточно рассмотреть все элементарные процессы, составляющие комплексный процесс одного полного «типового» цикла разрушения, что показано в работах автора [131,139,138,126,]. При этом важно показать параметры предыдущего цикла в этом процессе, которые являются «входными» для рассматриваемого текущего цикла, так же как и выходные параметры преобразования энергии ледового поля в энергию разрушения льда в этом цикле. Поэтому, до момента хрупкого или полу-хрупкого разрушения очередного слоя льда, понимаемого феноменологически как некоторый мгновенный разрыв напряжений и перемещений не на условной, а на физически реальной поверхности внутри

массива льда, все происходящие в нём сложные физические процессы, включая накопление микротрещин, следует рассматривать как единый процесс достижения этим слоем критического напряжённого состояния.

Схема циклического разрушения торцевой грани ледового поля при его взаимодействии с вертикальной опорой сооружения путем чередования скалывания клиновидных



блоков (1,3,5....) на верхней и нижней поверхностях ледовой плиты и последующего смятия ее «центрального клина» (2,4,6....): δ_1 – деформация упругого сжатия; δ_1^* – длина сминаемого участка льда; h_1 – остаточная толщина льда после скалывания боковых блоков.

Рисунок 5.3.10 Схема имитационной динамической модели циклического комплексного разрушения торцевой грани ЛП с несимметричными сколами и послойным разрушением средней части

Согласно схеме принятой имитационной модели (Рисунок 5.3.10) разрушение льда перед сооружением вертикального профиля *происходит неравномерно и хаотично* по площади контакта, при *случайном повторении характерных явлений*, подчиняющихся закону нормального распределения. На некотором текущем этапе, после скола блока **1*** (на Рисунке 5.3.10 не показан уже), лед в слое λ_1 при нагрузке по контакту упруго сжимается на величину δ_1 под действием давления p_2 , превышающего давление сжатие в зоне его «дальнего поля».

При накоплении критического значения плотности упругой энергии $\mathcal{E}_e$ в слое λ_1 , под углом α к верхней поверхности плиты из дефекта структуры или включения, имеющих случайное расположение (см. Рисунок 5.3.3), спонтанно развивается трещина сдвига (требуемая значительно меньших энергозатрат из-за влияния свободной грани), отделяющая от массива блок **1**. Поверхность скола не будет плоской, а в соответствии с

принципом минимума энергозатрат будет изогнутой (см. фото автора на Рисунках 5.2.2-а; 5.2.5-г и 5.2.6-а и теорию Kujala [271] на Рисунке 5.3.2). Это приводит к резкому падению нагрузки и ее перераспределению на кромке средней части плиты **2**.

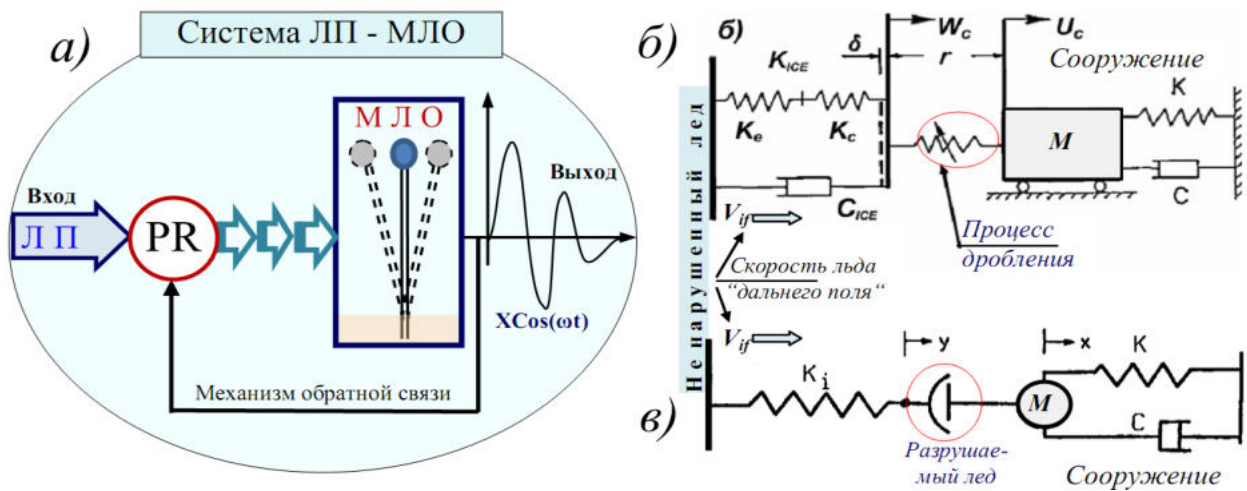
Здесь также, при достижении эффективной для этого слоя льда критической плотности упругой энергии до значения $\mathcal{E}_{cr}$, развиваются менее масштабные сколы боковых поверхностей этого участка и развитие трещин в его центре (по фото автора на Рисунке 5.2.2-а) с последующим смятием кромки льда на величину λ_1 до момента, когда вертикальный размер контакта достигнет значения h_1 . Затем, при постоянной скорости дрейфа ЛП в очередном слое льда λ_2 вновь накапливается упругая энергия до критического значения, постоянного для этого типа льда и его температуры – $\mathcal{E}_e$, достаточного для реализации сдвига очередного объема льда *произвольного объема 3*, но в сторону нижней поверхности плиты. Следующий цикл – достижение критического значения плотности упругой энергии $\mathcal{E}_{cr}$, эффективной для средней части плиты **4**.

Процесс повторяется при одновременно–последовательном проявлении на площади контакта сдвигов и раздавливания со *случайными периодами A_i и B_i* и с характерными для них, но *разными по природе и по величине значениями $\mathcal{E}_e$ и $\mathcal{E}_{cr}$* . Поэтому частота разрушения льда $f_i = 1/\Delta t_i$ будет различаться на каждом отрезке продвижения ЛП, движущегося с постоянной скоростью

$$V_{лп} = dL/dt). \quad (5.3.1)$$

5.3.3 Структурно – функциональный анализ имитационной энергетической модели возбуждения колебаний в системе ЛП – МЛС при циклическом разрушении льда

С целью апробации «работоспособности» имитационной динамической модели циклического разрушения льда еще раз обратимся к рассмотренному в главе 3 системному анализу: в **системе ЛП и МЛС** (Рис. 5.3.11 а) эти объекты, взаимодействуя между собой, порождают *новые явления*, не характерные для каждого из их вне системы. Это такие явления как: процесс *разрушения льда* и процесс *колебаний сооружения*.



- Рисунок 5.3.11 Функциональная схема автора рассматриваемой системы «ЛП – МЛС» (а) и модели взаимодействия: б) – по Kärnä [248]; в) – по Singh и др.[340]

Колебания сооружения в системе ЛП—МЛС, как следует из исследований автора [363,139], будут поддерживаться **инъекциями энергии** от движущегося ЛП в упруго отклоняющееся *сооружение* и в *массив льда*. Периодичность и объем отбора кинетической энергии ЛП (дозирование) осуществляется “автоматически” в результате функционирования **процессора системы PR**—*механизма разрушения льда* (Рисунок 5.3.11-а). Здесь процессор, подобно храповому механизму в часах или золотнику в паровой машине, является регулятором, запускающим процесс отбора части энергии от ЛП и расходования ее на разрушение льда. Но этот регулятор — виртуальный **само- программируемый процессор**, выполняющий как функции интегрирования нелинейного притока упругой энергии по переменному во времени и в пространстве напряженному объему льда, так и определения критического (порогового) значения **плотности потенциальной удельной энергии** в элементах этого объема. Одновременно в процессоре производится сравнение текущих значений этих двух величин и **запуск процесса разрушения** в напряженном объеме льда при превышении значения первой из них над второй. Следует отметить, что в отличие от моделей других исследователей, авторы работ [248,340] в их моделях взаимодействия ЛП—МЛС также выделили места расположения «генераторов» разрушения льда между изображениями этих двух элементов системы ЛП—МЛС (Рисунок 5.3.11– б, в), но математически не описали их функции в модели.

Рассмотрим случай подхода к имеющему поперечный размер опоры **D** и жесткость **G_S** сооружению ледового поля (ЛП) с определенными сочетаниями его скорости **V_{ЛП}**, толщины **h** и жесткости (прочности) льда (*ice*) **G_i** (Рисунок 5.3.12–а).

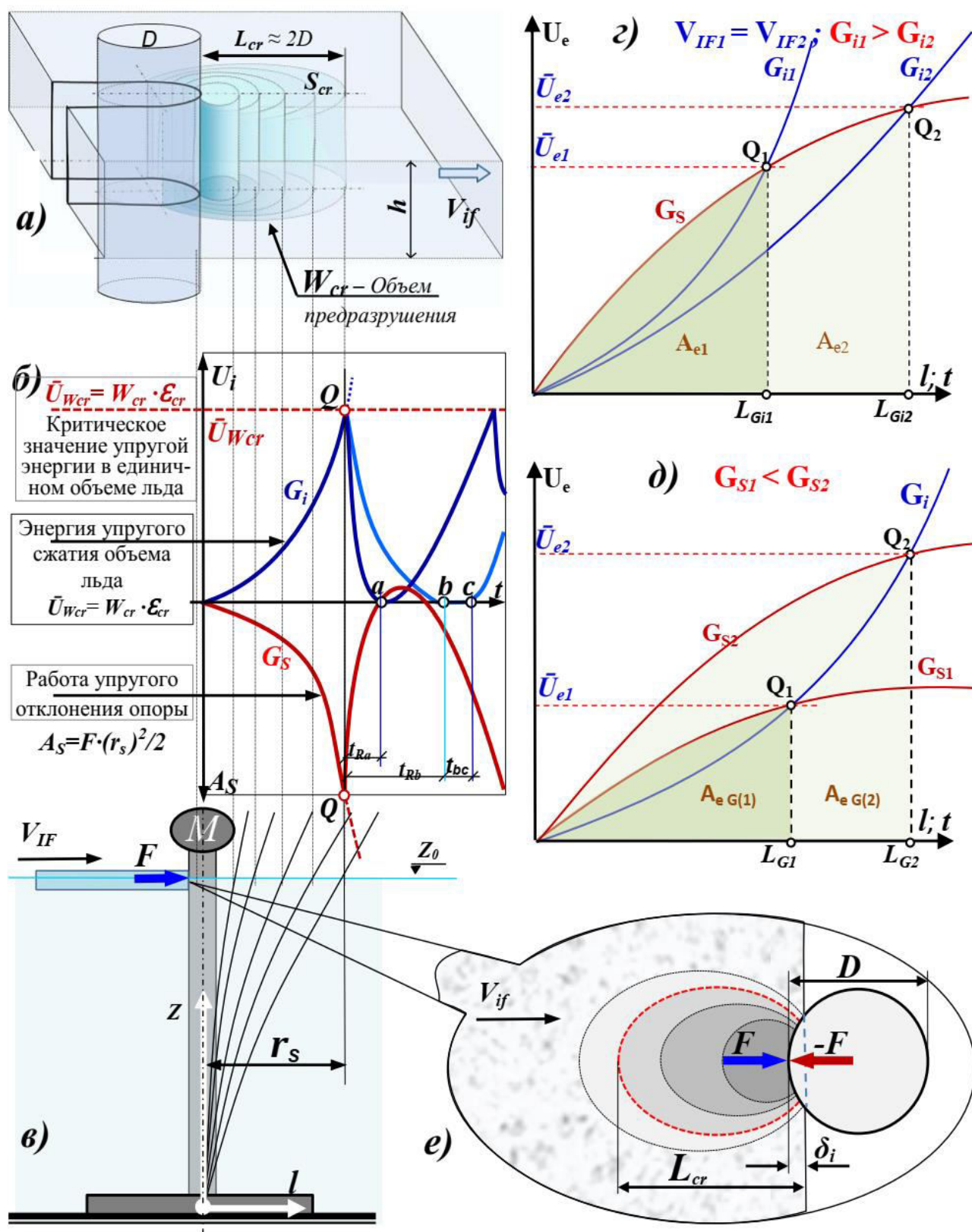


Рисунок 5.3.12 Демонстрации процессов возникновения колебаний МЛС, возбуждаемых циклическим разрушением льда на контакте с ЛП в процессе их взаимодействия при постоянной скорости ЛП (V_{if}) и изменениях жесткости льда (G_i) и сооружения (G_s)

Описание процесса передачи энергии ЛП в массив льда через опору сооружения и механизм накопления потенциальной энергии в деформируемом объеме льда в этой работе приняты согласно концепции, опубликованной в работах автора [370, 125].

Учитывая, что рассматриваемая система ЛП–МЛС является замкнутой, наиболее полно *процессы взаимодействия элементов внутри этой системы* могут быть описаны с помощью **закона сохранения энергии**. Запишем уравнение баланса расхода кинетической энергии ЛП $\Delta U_{\text{ЛП}}$ в зоне контакта путем ее передачи элементам системы ЛП–МЛС, в которых она в упругом (elastic) виде (ΔU_e) распространилась **за это же время**:

$$\Delta U_{\text{ЛП}} = \Delta U_e. \quad (5.3.2)$$

В активной фазе взаимодействия приток кинетической энергии $\Delta U_{\text{ЛП}}$ от ЛП в зону контакта в течение одного цикла нагружения происходит непрерывно, уровень потенциальной энергии U_w в напряженном объеме ЛП W_{cr} повышается (Рисунок 5.3.12–а, б) и одновременно производится работа по отклонению основания ледостойкого сооружения A_s (Рисунок 5.3.12–б, в). Из законов сохранения известно, что **физический смысл имеет не само значение потенциальной энергии** тела, а ее изменение в процессе его деформирования, в этом случае она представляет собой энергию упругой деформации.

Учитывая также **свойство аддитивности энергии**, изменение упругой энергии системы ΔU_e равно сумме энергии (работы) ΔU_s , затраченной на упругое отклонение опоры сооружения и потерь энергии на диссипацию в материале и конструкции сооружения, а так-же энергии ΔU_w , распространившейся в массиве льда в торцевой части ЛП за то же время:

$$\Delta U_e = \Delta U_s + \Delta U_w. \quad (5.3.3)$$

В процессе взаимодействия ЛП с МЛС в любой момент времени, предшествующий моменту разрушения льда в сжатом объеме, согласно третьему закону Ньютона, будет иметь место **баланс изменений энергий упругих деформаций** изогнутой опоры сооружения и сжатого объема льда.

$$\Delta U_s = \Delta U_w; \quad \Delta U_e = 2\Delta U_w. \quad (5.3.4)$$

Следовательно, баланс–тождество (5.3.2) в процессе взаимодействия ЛП и МЛС, с учетом (5.3.4), **может быть нарушено** только в 2–х случаях: при разрушении (потере устойчивости) сооружения или при разрушении льда. Постановка рассматриваемой здесь проблемы предполагает принятие в расчет таких размеров и параметров устойчивости или локальной прочности сооружения, которые выдержат максимально возможную ледовую нагрузку.

Таким образом, лед разрушится, запас упругой энергии в его напряженном объеме (Рисунок 5.3.12 -а) будет «сброшен» и:

- потенциальная энергия упругих деформаций в структуре напряженного единичного объема льда ϵ_{cr} **скачком перераспределится на вновь образованные поверхности трещин в массиве ЛП и поверхности обломков льда**, состояние которого в обломках и неразрушенном его объеме установится на уровне внутренней энергии ϵ_0 , соответствующей его физическому состоянию при данной температуре;
- потенциальная энергия упругих деформаций в материале конструкции сооружения перейдет в **кинетическую энергию обратного движения сооружения** к точке его равновесия в вертикальном положении.

Именно на этом моменте времени и на этой позиции состояния сооружения в рассматриваемой в диссертации проблеме следует акцентировать внимание по следующим пунктам:

1. В этот момент времени заканчивается полный одиночный цикл «отклонения от статического состояния – возвращения в статическое состояние» морского гидротехнического сооружения от действия ледовой нагрузки;
2. Повторение таких циклов приводит к **генерации колебаний (вибрации) МЛС** при воздействии на него **циклической ледовой нагрузки** от периодического разрушения льда на контакте МЛС с ЛП;
3. В каждом цикле имеют место **потери** получаемой МЛС части кинетической энергии ЛП, распределяемой в материале конструкции сооружения при его отклонении в виде **энергии упругих деформаций**, затрачиваемой на работу внутренних напряжений на **образование микро-сдвигов и микро-разрывов** в структуре материала;
4. Продолжительность активной фазы цикла регулируется энергетическим критерием динамического разрушения льда – эффективным значением предельной плотности удельной энергии механического разрушения льда ϵ_{cr} , **характерного для данного его физического состояния** и скоростью движения ледового поля $V_{ЛП}$;

Теоретическое обоснование данного критерия, теоретическая модель послойного разрушения льда и методы экспериментального определения этой величины показаны в предыдущих главах диссертации и опубликованы в работах [371,365,115,126]

Выводы по главе 5

Полученные в ходе исследования результаты дают основание предложить основополагающие для решения рассматриваемой в диссертации проблемы выводы, ранее опубликованные автором в статьях и докладах [123,131,368,126,139,363].

Основным результатом проведенного в данной главе диссертационного исследования следует считать не только теоретически и логически, но и экспериментально доказанным, что **именно явление разрушения льда является причиной и источником возникновения другого явления – колебаний МЛС.**

Явление разрушение льда в процессе взаимодействия имеет **динамический периодический характер**, а характер (механизм) разрушения льда определяет частоту и амплитуду возникающих колебаний сооружения. *Предложенный в работе экспериментально–теоретический метод дозирования затрат энергии на разрушение льда, позволил установить, что сущность явления цикличности ледовой нагрузки состоит в периодическом нарушении энергетического баланса двух основных процессов синхронного аккумулирования упругой энергии в отклоняющемся сооружении и в упруго деформируемом объеме льда.*

Главным параметром, **регулирующим процессы** упругого отклонения МЛС и сжатия напряженного объема льда перед внедряющейся в лед поверхностью опоры, является **размер порции кинетической энергии** ЛП, затрачиваемой на **работу по отклонению опоры и на сжатие некоторого объема льда в массиве ЛП до его критического напряженного состояния.**

1. Механизм разрушения льда играет в явлении цикличности ледовой нагрузки исключительную роль. **Наличие такого механизма, дозирующего «подкачку» энергии в колебательный контур системы** (в МЛС), согласно теории колебаний, является регулятором периода и амплитуды колебаний МЛС, ограничивающим рост ее значений при автоколебаниях и главным признаком автоколебательной системы.

2. Периодичность разрушения льда определяется **скоростью накопления упругой энергии деформирования льда** в зоне контакта кромки ЛП с сооружением, имеющей зависимость от скорости движения ЛП, жесткости системы и сил трения в ней. Разрушение льда, как процесс спонтанного освобождения потенциальной энергии, аккумулированной в его напряженном массиве, начинается в локальном объеме, где достигается нарушение равенства скорости притока энергии и мощности ее рассеяния.

3. Основным параметром, определяющим периодичность разрушения льда, т.е. периодичность сброса накопленной упругой энергии в каждом очередном упруго сжатом объеме льда в непрерывном процессе взаимодействия элементов системы ЛП–МЛС является критическое значение плотности удельной энергии упругого сжатия льда ε_{cr} , необходимое для «запуска» механизма разрушения льда в массиве торцевой грани ЛП. Превышение такого порогового значения энергии в единичном объеме льда, как показано в работах автора [74, 123, 363, 122, 126], вызывает разрушение этого объема и нарушение контакта лед-сооружение на какое-то время.

Рассмотренная **динамическая энергетическая модель** может использоваться для ее

применения в расчетах ледовой нагрузки при циклическом разрушении льда, потому что **она адекватно описывает реальный процесс периодического разрушения льда**. Поскольку **надежность сооружения** определяется количеством циклов внешней нагрузки, которые данная конструкция может выдержать без получения повреждений, которые делают ее эксплуатацию недопустимой по комплексу требований безопасности, **эффективное значение предельной плотности удельной энергии разрушения льда ε_{cr}** является ключевым параметром для расчета надежности МЛС на стадии его проектирования.

Глава 6 Методология определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на вертикальные сооружения шельфа с использованием энергетического критерия разрушения льда

В данной динамической задаче нагружения массива льда жесткой поверхностью опоры сооружения ее постановка обуславливает необходимость разработки *конститутивной реологической модели поведения льда*, где полученный критерий описывается одним из параметров напряженно-деформированного состояния льда и его критическое значение указывает на ***начало процесса разрушения*** в виде появления магистральной трещины или сети микротрещин в объеме льда. Для задач решаемой в диссертации проблемы, критерий разрушения льда в процессе непрерывного воздействия ЛП на опору МЛС должен быть ***«регулятором цикла»*** разрушения льда ***именно в зоне контакта опоры МЛС с гранью ЛП***. Это накладывает требование к критерию разрушения: ***по своей природе он должен соответствовать виду (механизму) его разрушения в модели взаимодействия***, что не удастся корректно выполнить с использованием силового подхода, повсеместно применяемого в расчетах прочности конструкций.

Изучение многих аспектов «силового описания» рассматриваемой проблемы ведется уже более пятидесяти лет, но, как отмечали некоторые авторы в конце прошлого и в начале нового века [28,59,120], многие детали процесса взаимодействия сооружения со льдом, которые приводят к возникновению вибрации, пока еще *не разработаны до уровня их использования в проектной практике*. Поэтому требуется продолжение исследований процесса взаимодействия ледового поля с основаниями сооружений для *определения предельных параметров энергозатрат на разрушение льда, включая частоты этого процесса*. **В настоящее время не существует метода, который дает возможность определения частоты разрушения льда f_L , поэтому его необходимо разработать.**

В этой главе, в продолжение исследований поставленной в диссертации проблемы необходимо продолжить решение запланированного для достижения цели набора задач с учетом уже выполненных решений и требованиями Норм, и в первую очередь:

- конкретизировать «расчетный» механизм разрушения льда для разработанной имитационной модели, ***обосновать и разработать*** соответствующий ему по физической природе и геометрии задачи ***новый, «более прямой» эмпирический способ определения численных значений критерия разрушения ε^**** для использования его в расчетной модели ледовой нагрузки;

- разработать ***методику определения расчетных значений параметров*** циклической ледовой нагрузки на МЛС: максимального значения силы ледового давления и длительности цикла ледовой нагрузки – периода разрушения льда;

- выполнить *верификацию метода определения расчетных параметров* циклической ледовой нагрузки по данным модельных и натурных экспериментов по прорезанию ЛП моделями МЛС ;
- разработать *рекомендации по применению нового критерия* динамического механического разрушения льда в расчетах параметров цикличности процесса: максимальных значений контактной силы и ее частоты как исходных данных для динамического расчета МЛС шельфа.

6.1 Согласование разработки метода расчета параметров цикличности ледовой нагрузки с требованиями нормативных документов по исходным данным для динамического расчета МЛС

Учитывая достаточный для инженерных приложений уровень разработки методов расчетов морских гидротехнических сооружений и их оснований на динамическую нагрузку [8,16,94,106], решение задачи о получении расчетных параметров циклического разрушения льда для расчета ледовой нагрузки на МЛС, адекватных реальным физико-механическим процессам взаимодействия ЛП с МЛС, является приоритетной задачей в решении рассматриваемой проблемы.

Расчетные значения параметров нагрузки на сооружения, тем более на уникальные по конструкции и повышенной ответственности в силу их работы в суровых климатических условиях и при повышенных требованиях экологичности, должны опираться на существующие национальные и международные нормы, регламентирующие обеспечение требований нормативных документов по проектной надежности. В частности, набор и значения параметров динамической ледовой нагрузки должны соответствовать требованиям Межгосударственного стандарта «Надежность строительных конструкций и оснований» (ГОСТ 27751-2014, 37).

Согласно общим положениям и требованиям указанного ГОСТ 27751-2014, для каждого предельного состояния, которое необходимо учитывать при проектировании, должны быть установлены расчетные модели сооружения, его конструктивных элементов и оснований, которые должны отражать действительные условия их работы и соответствовать рассматриваемой расчетной ситуации с учетом их конструктивных особенностей, а также действующие нагрузки и воздействия. Расчетная схема должна включать в себя: «расчетные модели нагрузок и воздействий; расчетные модели, описывающие напряженно-деформированное состояние элементов конструкций и оснований; расчетные модели сопротивления».

Настоящее исследование, во исполнение указанного выше положения ГОСТ 27751-2014 о расчетных моделях, направлено на заполнение «белого пятна» в *методологии*

проектирования морских гидротехнических сооружений: на исследование не имеющую нормативного обеспечения расчетной модели горизонтальной динамической ледовой нагрузки на МГТС. В приложении к уникальным морским ледостойким гидротехническим сооружениям, предназначенным для эксплуатации в суровых климатических условиях, такая расчетная модель ледовой нагрузки, согласно требованию п. 11.3 указанного ГОСТ 27751-2014 [37] должна включать в себя ее **интенсивность** (величину), место приложения, направление и продолжительность действия. Учитывая динамический характер ледовой нагрузки «должны быть заданы закон изменения нагрузки во времени или **характерные частоты** и, при необходимости ... **спектральные характеристики** (энергетический спектр, ...). Кроме того, «... необходимо учитывать зависимость воздействий от реакции сооружения».

Таким образом, **амплитуды пиков ледового давления и частота циклов разрушения льда** — расчетные параметры для выполнения динамического расчета с целью определения надежности и долговечности шельфовых сооружений.

Соблюдение приведенных нормативных требований для МГТС особенно принципиально, поскольку параметры циклической ледовой нагрузки являются основополагающими факторами при выборе типов и конструктивных особенностей МГТС в процессе его проектирования не только исходя из требований технологичности и экономичности проекта в целом, но, прежде всего, требований надежности. Существующие расчетные модели получения ледовой нагрузки, используемые в них критерии прочности льда, не соответствуют требованию основополагающего нормативного документа (ГОСТ 27751-2014) [37], поэтому требуется **разработка новой расчетно-экспериментальной методологии**, основанной на энергетическом подходе к описанию явления функционирования системы «ЛП – МГТС».

К настоящему времени пока не создано метода, который на основании полученных из инженерных изысканий в районе строительства шельфового сооружения исходных данных даст результат его **расчета на циклическую ледовую нагрузку в виде гарантированного срока эксплуатации такого сооружения в ледовых условиях района его возведения**.

Из физических соображений понятно, что автоколебания в системе ЛП–МЛС могут существовать при определенных соотношениях параметров платформы, ледового поля и льда (см. рисунок 5.3.12). При этом с увеличением амплитуды **длительных циклических воздействий ледовой нагрузки** на МЛС должен возникнуть предельный цикл установившихся колебаний (резонанс) в Системе с одной из собственных частот колебаний МЛС или с некоторой промежуточной частотой. В качестве источника **длительных циклических воздействий ледовой нагрузки на МЛС** эти авторы указали на характерный размер (глубину) разрушаемого участка льда перед опорой L_{σ} на каждом цикле разрушения (Рисунок 6.1.1, а).

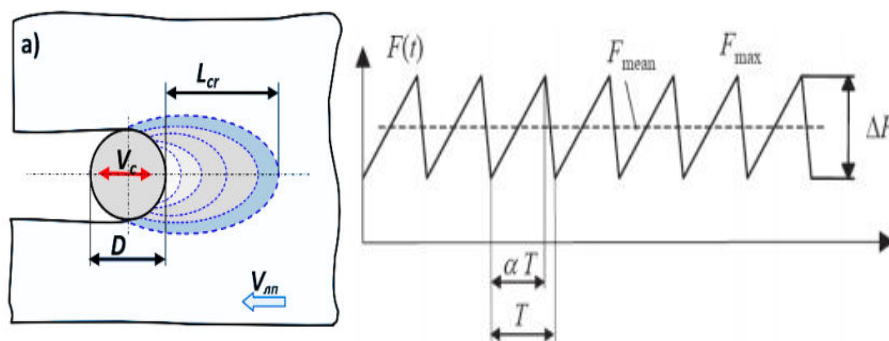


Рисунок 6.1.1 Стилизованный график ледовой нагрузки на МЛС

Но этот подход не привел к решению проблемы адекватного расчета МЛС на циклическую нагрузку, поскольку **амплитудно-частотный спектр реального процесса контактного разрушения льда** (См. записи на рисунках 1.6.1 – 1.6.2 и далее) не может быть адекватно описан классической «пилообразной» функцией (Рисунок 6.1.3-б) с большим количеством переменных, таких как толщина льда h , его прочность R_L , скорость дрейфа ледового поля V , ширина опоры D и ее податливость, соотношения геометрических параметров опоры и ледового поля D/h , их жесткостей и ряда других.

Определенные гарантии точности получения статистически достоверного значения **максимальной амплитуды силы давления льда** на опору сооружения, также как и **периода цикличности разрушения льда** в рассматриваемой многофакторной задаче могут дать только вероятностные методы расчета надежности, которые в отличие от детерминистских вводят в явном виде **фактор времени**, что значительно повышает их информативность. Так, по аналогии с **расчетами строительных конструкций** на воздействие нагрузок, имеющих стохастическую природу, в качестве метода, который с определенной степенью надежности позволит рассчитать **нормативную долговечность** МЛС может быть рассмотрен один из вероятностных методов В.В. Болотина, А.П. Ржаницина или Н.С. Стрелецкого [8,16,94,106]. Все эти методы основаны на использовании в расчетах вероятностной надежности сооружения.

Для использования названных вероятностных методов теории надежности строительных конструкций по имеющейся цифровой записи контактной силы (Рисунок 6.4.2-г) необходимо выполнить статистическую обработку ряда данных, и по кривой **плотности вероятностей распределения** этой случайной величины определить **два центральных момента силы давления льда – как случайной величины**: среднее значение этой величины (*математическое ожидание*) $\overline{F_{CP}}$ и стандартное отклонение для всех значений имеющегося ряда данных силы σ (квадратный корень из дисперсии всех значений силы) (Рисунок 1.6.9,а). Эти расчетные характеристики распределения ледовой нагрузки позволяют в определенном Техническом задании На Проект МЛС нормативе доверительного

интервала требующегося решения получить максимально возможное значение – **расчетное значение амплитуды ледовой силы F_{max}** [8,16,94,106].

Но для расчетов сооружения на циклическую ледовую нагрузку необходим еще один важнейший параметр колебательного процесса в системе ЛП–МЛС: **время одного цикла разрушения льда** – как расчетного параметра **периода повторения (частоты) пиков ледовой нагрузки**. Учитывая многофакторность процесса разрушения льда, необходимо применение вероятностного метода, который базируется на физических процессах разрушения льда. Это связано с тем, что при непосредственном воздействии льда на жесткую поверхность опоры морского сооружения проявляется феноменологическая особенность этого процесса, заключающаяся в следующем.

В каждый момент времени контакта система ЛП–МЛС находится в равновесии, при этом идет передача сооружению **некоторой порции энергии ЛП**, достаточной для его упругого отклонения до некоторого критического уровня его сопротивления упругому отклонению, когда напряженно-деформированное состояние в массиве льда в зоне контакта достигнет критического предела, **отчего лед разрушится на некоторую глубину L_{cr}** . То есть, поступательное механическое движение ЛП генерирует циклическое разрушение льда с некоторым периодом, зависящим от скорости дрейфа ЛП и ряда других факторов, что, в свою очередь, при частотах разрушения льда, близких к частоте собственных колебаний МЛС, может породить классический автоколебательный процесс в системе ЛП–МЛС без дополнительных средств и устройств.

Таким образом, теоретически, кинетическая энергия ЛП затрачивается на **работу по разрушению объема льда**, совершаемую механизмом его разрушения циклически (только в период прямого контакта с целиком льда) и на работу по выдавливанию продуктов его разрушения за пределы контактной зоны. Численно эта работа может быть описана только объемной работой – в соответствии с четвертой теорией прочности, поэтому необходимо, в первую очередь, рассмотреть возможность применения энергетического подхода

Расчет возможности возникновения резонанса по сути – сравнение 2-х частот: частоты разрушения льда f_L (то есть – именно «ледовой нагрузки») для расчетных условий и ближайшего значения собственной частоты МЛС – f_{MLC} .

Поэтому, как в любой динамической модели разрушения материала, в данной постановке задачи необходимо определить два основных физических параметра, характеризующих исследуемое явление как переход напряженного объема льда из неразрушенного состояния в разрушенное: предельное **минимальное эффективное значение удельной плотности упругой энергии**, вызывающей разрушение льда его единичного объема $\mathcal{E}_{cr}^*$ и **период появления** этих критических значений t_{cicl} .

6.2. Исследования типов и процессов локального разрушения ледового поля на контакте с опорой гидротехнического сооружения

Экспериментальные исследования по определению численных значений принятого энергетического критерия ε^* , выполненные в четвертой главе известным и апробированным экспериментальным методом «падающих сфер», не только обеспечили эмпирическое доказательство принятой в главе 3 гипотезы *об исследуемом критерии*, но и показали реальную возможность его применения в разработанной имитационной модели расчета ледовой нагрузки.

В то же время, тщательный *анализ основы метода – явления контактного разрушения льда* показал, что это феноменологическое явление достаточно сложное: в течение одного акта внедрения индентора в поверхность ледового покрова происходит, как правило, несколько самостоятельных циклов разрушения льда, количество которых определяется запасом энергии падающего индентора, т.е. его массой и начальной скоростью удара. И несмотря на то, что полнофакторный эксперимент показал инвариантность метода по отношению к исследуемой характеристике – удельной энергии разрушения льда, она имеет существенные разбросы значений, не связанных со статистической изменчивостью параметров льда, а отражает чисто физико-механический аспект явления.

Для получения корректного с точки зрения вычисления значения удельной энергии оно должно отражать отношение фиксированного количества энергии, затраченной на разрушение фиксированного объема разрушенного льда. Это означает, что из расчетного значения энергии следует исключить ее потери на процессы, не связанные именно с разрушением льда, а в расчетный объем разрушенного льда нельзя включать оставшиеся в каверне продукты разрушения льда. На стадии подтверждения принятой гипотезы¹⁰ эти детали не помешали ее доказательству, но они создают определённые сложности в реальных изысканиях расчетных значений удельной энергии разрушения льда методом падающих сфер.

Алгоритм расчета ледовой нагрузки, также как и другой и для других сооружений, воспринимающих нагрузку от внешних воздействий понятен. Сначала определяется механизм разрушения того объекта, который по проекту должен разрушаться: элемент конструкции или ее фрагмент, либо воздействующее тело на конструкцию тело – как в рассматриваемом случае. Затем рассматривается напряженно-деформированное состояние массива льда в зоне у «рабочей» грани ледового поля – в данном случае. ***В зависимости от реального механизма разрушения*** материала реального тела, воздействующего в

¹⁰ Смотрите выводы по Главе 3

реальных условиях на объект, выбирают или назначают **критерий прочности (критерий разрушения)** – для морского льда в данном случае. При этом, если все элементы модели взаимодействия должны быть адекватны моделируемому реальному процессу и соответствовать друг-другу (см. «Схему обеспечения соответствия критериев НДС льда в образцах и в ледовой плите в методе расчета надежности МЛС» на рисунке 1.8.8)). Это достаточно строгое требование, именно его выполнение может дать возможность обеспечить расчетную достоверность полученных результатов расчетов параметров цикличности ледовой нагрузки на МЛС.

Поэтому, по изложенной логике, в отличие от «абстрактного – комплексного» механизма, который подразумевается в действующих в настоящее время нормативных методологиях и **фигурировал в ранее в пятой главе данного исследования, следует конкретизировать «расчетный» механизм разрушения** и обосновать соответствующий ему по физической природе **критерий разрушения для** использования его в **расчетной модели ледовой нагрузки**. Такие феноменологические особенности явления разрушения льда следует учитывать в расчетной модели ледовой нагрузки на сооружение, это условие предопределяет поиск и разработку другого, более прямого» способа получения энергетического критерия прочности морского льда ϵ^* . Такой способ разработан и представлен в этом разделе.

6.2.1 Теоретические исследования локального разрушения ледового поля в зоне его контакта с опорой гидротехнического сооружения

Уже первичный анализ факторов, обуславливающих исследуемые параметры взаимодействия основных контактирующих элементов в системе ЛП–МЛС показал, что в любой модели, предлагаемой для формализации этого явления и его описания как механического процесса, необходимо учитывать хотя бы основные феноменологические особенности ледового поля – как источника энергии, льда – как материала разрушаемой среды, а также сооружения – как инструмента разрушения (прорезания) полубесконечной плиты, состоящей из льда. Данные проведенного обзора и собственные исследования автора позволяют сделать вывод: основными феноменологическими особенностями **процесса разрушения льда** на торцевой грани дрейфующего ледового поля являются следующие:

- особенности формирования полей напряжений в полубесконечной пластине ледового поля в зависимости от его толщины, поперечного размера и формы внедряющегося в его грань сооружения и скорости волны нагружающих напряжений (положение кристаллов по отношению к вектору внешней силы, плоское напряженное, плоско-

деформированное или объемно-напряженное состояние в зоне, прилегающей к поверхности контакта (Рисунок 6.2.1);

- особенности строения льда – как материала, имеющего **кристаллическую структуру и сложную текстуру**: размеры и ориентация кристаллов; пористость; наличие ячеек с рассолом; изменения всех этих параметров по толщине льда и т.д. (См. рисунки в главе 2);

- особенности, обуславливающие существенную нелинейность **зависимости упругости и прочности льда от скорости его деформирования** (текучесть, вязкий или хрупкий механизм разрушения связей кристаллической решетки, сцепление и трение внутри кристаллов и межкристаллическое сцепление и трение в зависимости от фазового состояния солей и т.д.).

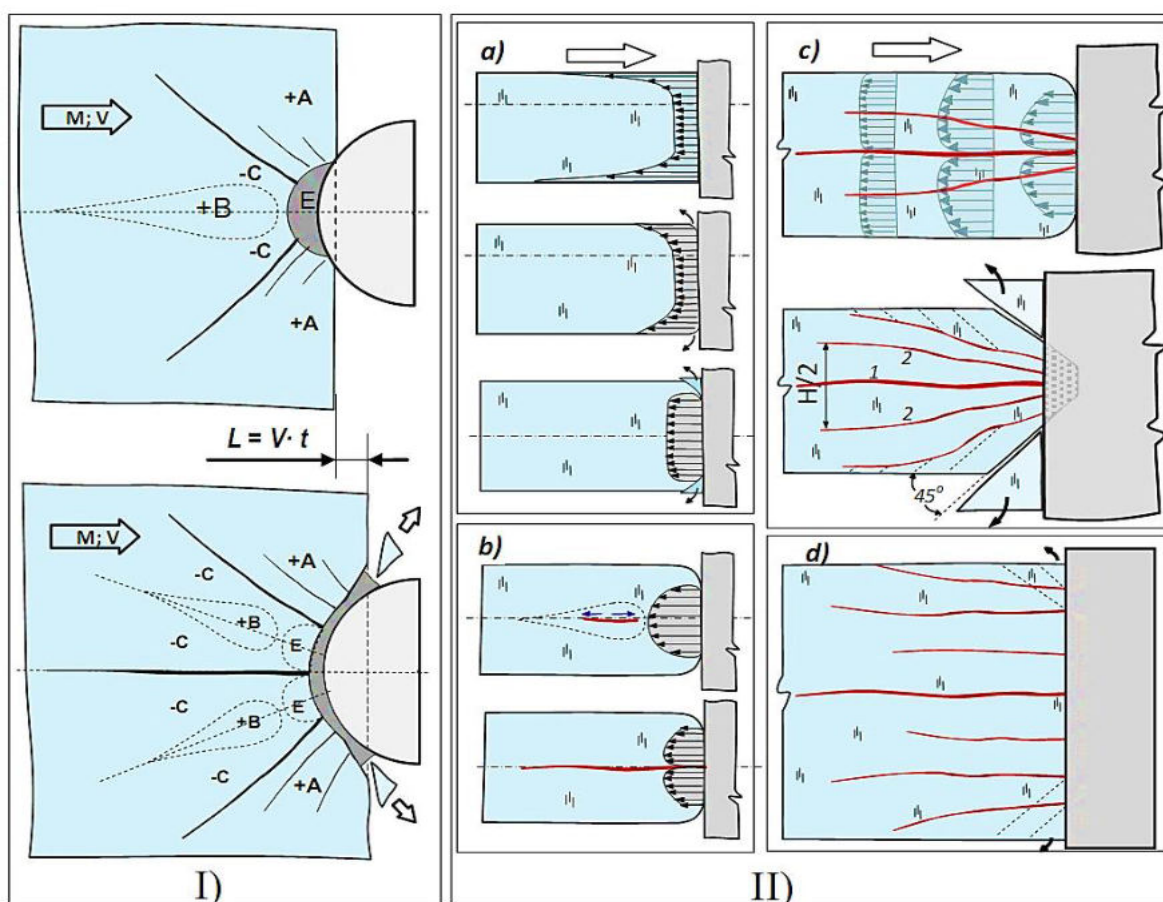


Рисунок 6.2.1 Схемы развития напряженного состояния и процессов развития трещин и разрушения льда в зоне контакта при взаимодействии вертикальной опоры МЛС с кромкой ЛП– по [125,139]: I – зоны концентрации напряжений и развития вертикальных трещин; II – то же горизонтальных трещин

Очевидно, что поля напряжений, возникающие в ледовом поле в зоне его контакта с сооружением, создают зоны концентрации критических значений упругих напряжений и деформаций, приводящих к массовому появлению в этих зонах микротрещин различной природы, накопление и коалисценция которых проводят к развитию магистральных

вертикальных и горизонтальных трещин, сколов, дроблению осколков и экструзии крошки льда из зоны контакта.

В 1980 году в работе автора [125] впервые, на основании анализа опубликованных в разное время в течение полувека работ с отдельными предложениями и решениями теоретического плана по образованию отдельных видов трещин, были систематизированы все характерные *элементы локального разрушения ледовых полей* в зоне их контактов с опорами морских гидротехнических сооружений. Используя часть собственных данных из ранее проведенных экспериментов [117], аналогии из механики контактного разрушения материалов [49,24], теории упругости, механики грунтов и данных отдельных исследований по механике разрушения льда [111], была разработана *феноменологическая модель картины разрушения торца ледовой плиты* ((Рисунок 6.2.1).

Рассмотренные феноменологические особенности разрушения ледяного поля, взаимодействующего с вертикальной гранью опоры стационарного сооружения могут быть взяты за *основу при разработке математических моделей* для расчета ледовой нагрузки. Образование вертикальных радиальных трещин в ледяной плите и горизонтальных трещин, «расщепляющих» плиту льда обусловлено возникновением перед внедряющейся опорой сильно уплотненной зоны спрессованных продуктов смятия раздробленного льда, материал в которой обладает свойствами вязкой жидкости [304,241,111]. Согласно канонам теории упругости, через уплотненное ядро контактное давление распределяется по гидростатическому закону внутри этой зоны и, согласно закону Герца, создаёт на некотором удалении перед ней область растягивающих напряжений (Рисунок 6.2.1). При определенном соотношении напряжений в зонах сжатия (С) и растяжения (А и В) в области контакта ледяной плиты и опоры возникают трещины «отрыва». Сжатые до больших давлений продукты разрушения льда при их экструзии создают усилия, обеспечивающие сколы верхней и нижней частей плиты, а также нагнетание их части в крупные трещины, заставляя их расти. Природа всех трещин различна, но их вариации укладываются в «стандартный набор» механики разрушения: «трещины продольного сдвига» и «трещины нормального отрыва».

Многие исследователи предпринимали попытки математически описать механизм разрушения льда, но, как правило, рассматривая его отдельные составляющие, чаще всего сдвиг верхних и нижних блоков–клиньев [343,344], и в том числе и возникновение вертикальных радиальных трещин в ледовом поле и горизонтальных трещин «расщепляющих» ледяную пластину [222]. В основном, рассматривалось внедрение пуансона (опоры) с плоскогранью или цилиндрического индентора в полупространство из упруго-пластического материала с использованием аппарата теорий упругости и пластичности [62,9,317,171,10,19,270,344,343,373]. При этом в качестве критериев разрушения льда часто использовались критерии, «выведенные применительно к

пластичным металлам. Эти критерии относятся к изотропным материалам, имеющим одинаковую прочность на разрыв и сжатие и нечувствительным к гидростатическому давлению» [375].

Роль *механизма разрушения льда* в задачах определения ледовой нагрузки на МЛС состоит в том, что каждый из таких механизмов является результатом упорядоченного протекания различных физических процессов, каждый из которых, как можно предположить, можно описать математически. Но в работе автор [139] показал, что теоретический учет лишь части перечисленных феноменологических особенностей в *математическом описании* явления контактного взаимодействия льда с сооружением, учитывая их количество и разнообразие, в рамках инженерно-проектного подхода **не представляется возможным**. Тем не менее каждой из указанных и не обозначенных здесь особенностей многие ученые посвятили свои исследования (Ссылка на обзор во второй главе). Особое место в ряду таких работ занимают *экспериментальные исследования механизмов разрушения льда* при прорезании натурного ледового покрова или ледяных пластин, созданных в майнах, моделями опор. В настоящее время проведение эксперимента возможно осуществить с помощью прикладных вычислительных пакетов путем создания численных математических моделей с использованием МКЭ. Результаты такого моделирования, выполненного автором для разных сочетаний геометрических параметров задачи [139], физико-механических свойств льда и др., приведены в следующем разделе.

6.2.2 Компьютерная валидация феноменологической модели разрушения льда при внедрении опоры сооружения в кромку ледового поля

Учитывая выявленную при разработке дескриптивной модели сложность реального процесса разрушения льда в рассматриваемой природно-техногенной *системе ЛП–МЛС*, для выявления его деталей и составляющих его субпроцессов автором [120] было выполнено компьютерное имитационное моделирование изменения напряженно-деформированного состояния массива льда в зоне контакта края ледовой плиты с поверхностью цилиндрической опоры сооружения. Целью проведенного компьютерного моделирования процесса взаимодействия элементов системы в такой постановке задачи был *сравнительный качественный анализ* полученной картины и параметров моделируемого процесса и явлений трещинообразования с результатом разработки дескриптивной модели изучаемого процесса на основе анализа массива экспериментальных данных и, при необходимости, последующее уточнение дескриптивной модели. Поэтому выполненное моделирование носит качественный, информационный характер.

Задача имитационного компьютерного моделирования была выполнена автором

[120] с использованием МКЭ в программе LS-Dyna в пакете ANSYS путем создания численных 2D и 3D моделей развития явлений взаимодействия торца ледяного поля с вертикальной цилиндрической опорой МЛС. В постановке задачи была принята частичная идеализация свойств структурных элементов системы ЛП–МЛС: лед, как материал ледовой плиты, моделировался континуальной средой с упругопластическими уравнениями состояния; скорость ЛП принята постоянной; цилиндрическая опора сооружения принята неподвижной, имеющей жесткую поверхность.

С целью определения чувствительности выбранной имитационной модели к неопределенности исходных данных автором [120] проводились расчеты для параметров, которые являются в реальном мире не детерминистическими, а стохастическими величинами. Прежде всего, в качестве *определяющего критерия* рассматривалось отношение геометрических размеров диаметра опоры сооружения и толщины льда, а также «неопределяющего» критерия – жесткости льда, описываемой значениями модуля упругости и прочности. Этот критерий варьировался в двух уровнях, условно названными как «слабый» (теплый) и «прочный» (жесткий) лед. Поскольку в расчетном случае следует принимать прочный лед, вариант расчета для «слабого» льда рассматривался исключительно для методологического анализа и сравнения размеров напряженных объемов и времени добегания волны напряжений.

На рисунке 6.2.2-а₁–е₁ приведены отдельные примеры полученных автором [120] методом численного моделирования картин напряженно-деформированного состояния массива льда в торцевой грани ледовой плиты в зоне ее контакта с цилиндрической опорой сооружения. Результаты имитационного компьютерного моделирования **полностью подтверждают** основные положения рассмотренной выше теоретической дескриптивной феноменологической модели разрушения торцевой грани ледового поля на контакте с цилиндрической опорой сооружения: **типы и порядок возникновения и развития** основных вертикальных трещин (a , a_1 , b , b_1); горизонтальных трещин в толщине ледяного поля (z , z_1 – e , e_1), а также трещин сдвига (скола) в зоне контакта с опорой (e , e_1).

Наложение "теоретических" **картин роста трещин** в соответствующих областях массива льда в зонах концентрации растягивающих напряжений (область +А и +В на Рисунке 6.2.2) и возникающих под действием давления в объемах сжатия (области -С и -Е) на картину распределения напряжений, полученную численным методом, показывает их полное совпадение, что говорит об уникальности картин разрушения льда.

Таким образом, на текущем этапе исследования проблемы разработанная автором [120] дескриптивная феноменологическая модель получила качественную верификацию с помощью компьютерного эксперимента. Из выполненного автором анализа источников [139] следует, что описанные явления полностью согласуются с результатами исследований по внедрению моделей цилиндрической опоры в край ледового поля: Вершинина и

др. [17], Храпатога и Цуприка [117]; Bekker [155], [171]; Karulin и др. [255]; Kujala [271]; Нырауама и др. [222]; Haynes и др. [218], Saeki и др. [329], Michel и Toussaint [298]; Kry [270], Taylor [58], Riska [236]; Sodhi [344,343], Yamashita и др. [381], Tuhkuri и др. [373].

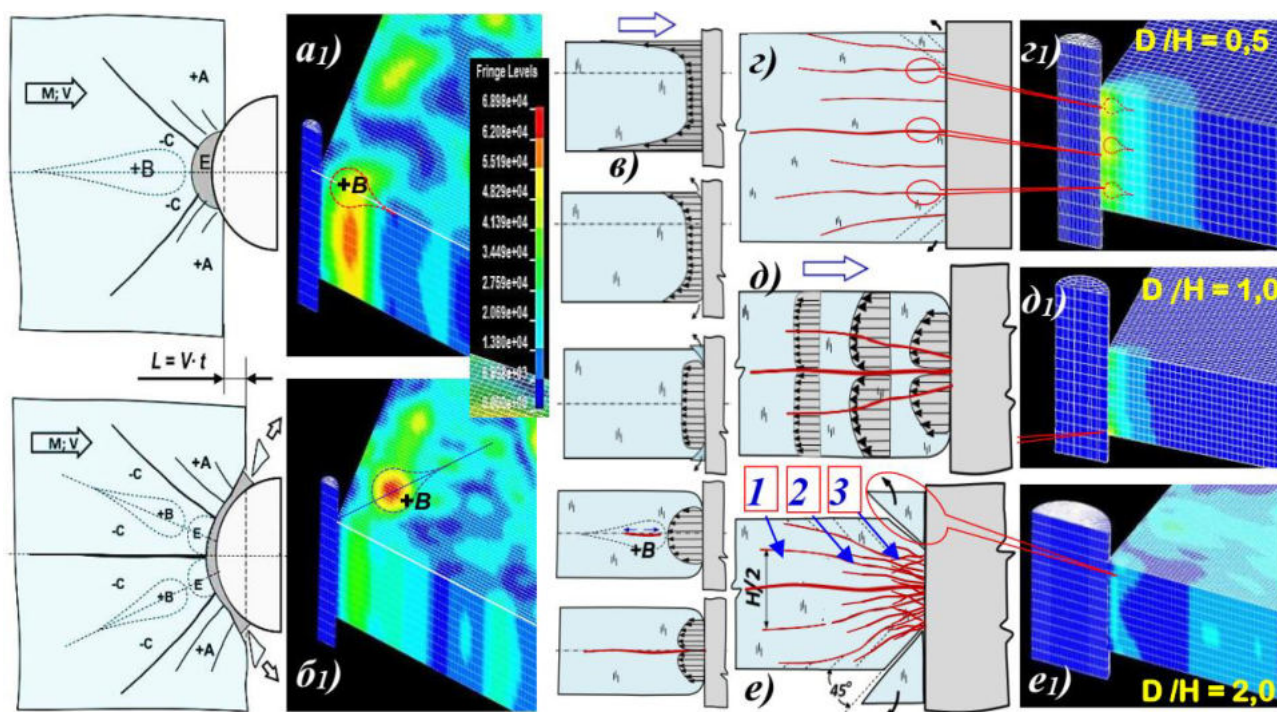


Рисунок 6.2.2 Результаты теоретического и экспериментального численного исследований распределения напряжений на контакте ЛП с опорой МЛС

Полученные экспериментальные данные позволили автору [120] выявить **новый научный результат**: известный по множеству исследований «эффект стеснения» (учитываемый в формуле расчета ледовой нагрузки коэффициентом «смятия», впервые, на основании обнаружения «эффекта обоймы» по результатам простейших опытов, введенным в практику нормирования расчетов К.Н. Коржавиным в 1960-х годах [63]), на самом деле должен учитываться только в том случае, если процесс прорезания ледового поля опорой будет стабильно происходить по механизму разрушения льда сжатием/смятием при «сложном напряженном состоянии» (Рисунок 4 а) в его торцевой грани. Это возможно при непрочном льде, узкой опоре и относительно высокой скорости движения ледового поля. Но с увеличением соотношения D/h более значения 1,0 – 1,5 в механизме разрушения льда начинается «физический переход» к формированию плоского напряженного состояния и в плоских сечениях плиты льда перед широкой опорой будет превалировать сдвиговый характер разрушений у свободных нижней и верхней граней ледовой плиты (Рисунок 6.2.3 -б,в).

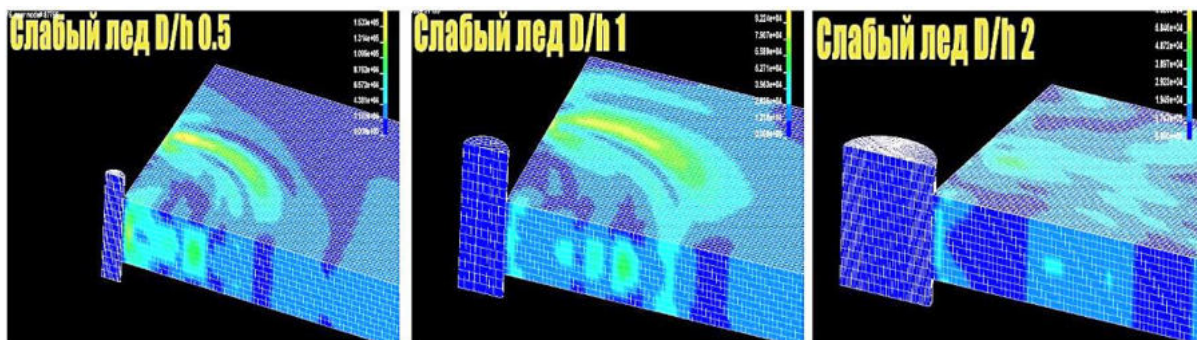


Рисунок 6.2.3 Изменение типа механизма разрушения льда от объемного в условиях сложного напряженного состояния (а) до плоского напряженного состояния плиты (в) с разрушением льда по механизму «сдвига клиньев»

6.2.3 Физическое моделирование – валидация теоретической и компьютерной моделей процессов развития разрушения льда в массиве торцевой грани ледового поля

Этот раздел главы 6 посвящен разработке и реализации метода физического моделирования процесса взаимодействия вертикальной цилиндрической опоры сооружения с кромкой ледового поля. В последние 25-30 лет исследователями во многих странах было выполнено достаточно много полунатурных экспериментов для исследования параметров разрушения льда и определения силы, вызывающей разрушение льда. Анализ результатов таких экспериментов проиведен во второй главе и в разделе 5.2.1 пятой главы дан обзор некоторый специфических экспериментов. Во многих случаях эксперименты проводились на натурном морском ледяном покрове с размещением силовых гидравлических агрегатов в искусственных майнах, в еще большем числе случаев процесс взаимодействия изучался на моделях на искусственном льду в ледовых бассейнах. Эти исследования, как правило, выполнялись по заказам операторов конкретных проектов по строительству сооружений для ледовых условий, в частности мостовых опор. В то же время среди всех исследований, *только в единичных случаях* в качестве одной из целей исследований встречается исследование картины разрушения льда на контакте с внедряющей гранью.

Здесь представлены результаты *разработанного и осуществленного автором физического эксперимента*: моделирования процесса взаимодействия цилиндрической опоры МГТС с натурным ледовым покровом. **Основной целью** этого эксперимента была *валидация¹¹ численной и феноменологической моделей*, которыми были предсказаны

¹¹ Эта процедура сопоставления, как действие – по «валидации» здесь применяется в прямом понимании

механизмы разрушения льда развитием системы трещин в торце ледовой пластины разной толщины при воздействии на неё цилиндрической опоры сооружения, представленные в двух предшествующих разделах. **Второй целью** физического эксперимента было детальное изучение механизма разрушения льда для применения в *разработке имитационной математической модели* контактного взаимодействия с учетом циклического характера ледовой нагрузки. Поэтому некоторые результаты этого эксперимента приведены *в разделе 5.2.1 пятой главы*.

В качестве механизма воздействия, имитирующего воздействие ледового поля, была разработана конструкция специального копра с баллистическим маятником. Копер (Рисунок 6.2.4) с необходимыми механизмами и приспособлениями был установлен на льду ($h \approx 0,9$ м) Амурского залива в г. Владивостоке. Что описано в работах автора [117.139.368]. Эксперименты выполнялись в течение двух зимних месяцев, часть пришлось на достаточно холодный период.

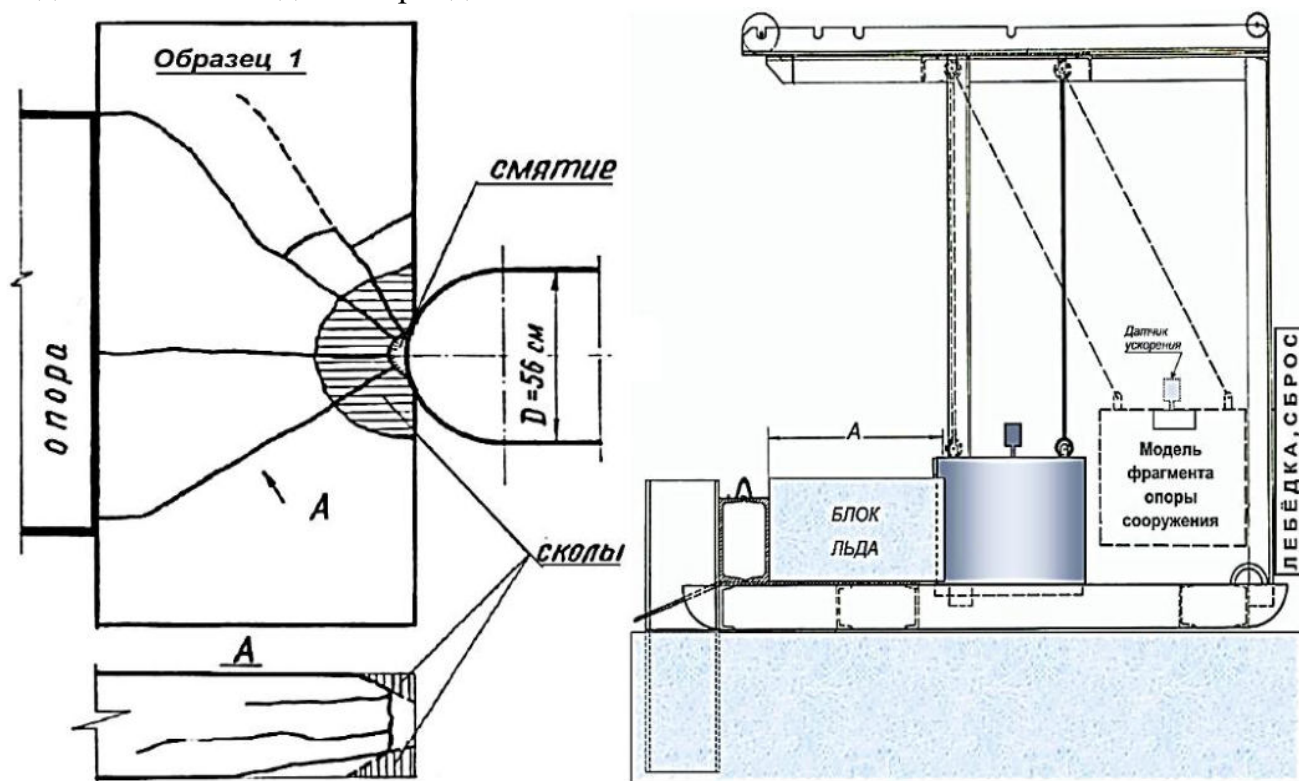


Рисунок 6.2.4 Исследования механизмов разрушения кромки морского ледового покрова на блоках природного льда на экспериментальном стенде

На рисунке 6.2.5 приводятся фотографии автора поперечных сечений плиты льда (по типу вида A на рисунке 6.2.5 -а), где трещины в вертикальной плоскости - что отчётливо видно, помимо «правильного» горизонтального расположения могут также, как и в

перевод с английского: validation – есть 1) ратификация, утверждение, 2) легализация, признание законной силы.... *подтверждение предсказанных механизмов разрушения льда развитием системы трещин в торце ледовой пластины*

горизонтальной плоскости, иметь «радиальную» направленность. Причиной того, что многие трещины начинают развиваться «по направлению от центра», является наибольшая **концентрация упругих напряжений** в этом месте контакта, при достижении предельных значений которых происходит лавинообразное трещинообразование.

Цель набора статистики по показателям силы контактного взаимодействия не ставилась. Система вертикальных трещин, разделяющих плиту на сектора с центральным углом 45 градусов (Рис. 4.2,а) и горизонтальных трещин, (Рис. 4.3) которые приводили к разрушению кромки ледового поля в эксперименте, полностью подтвердили выводы, полученные из наших теоретических исследований и большей части других авторов.

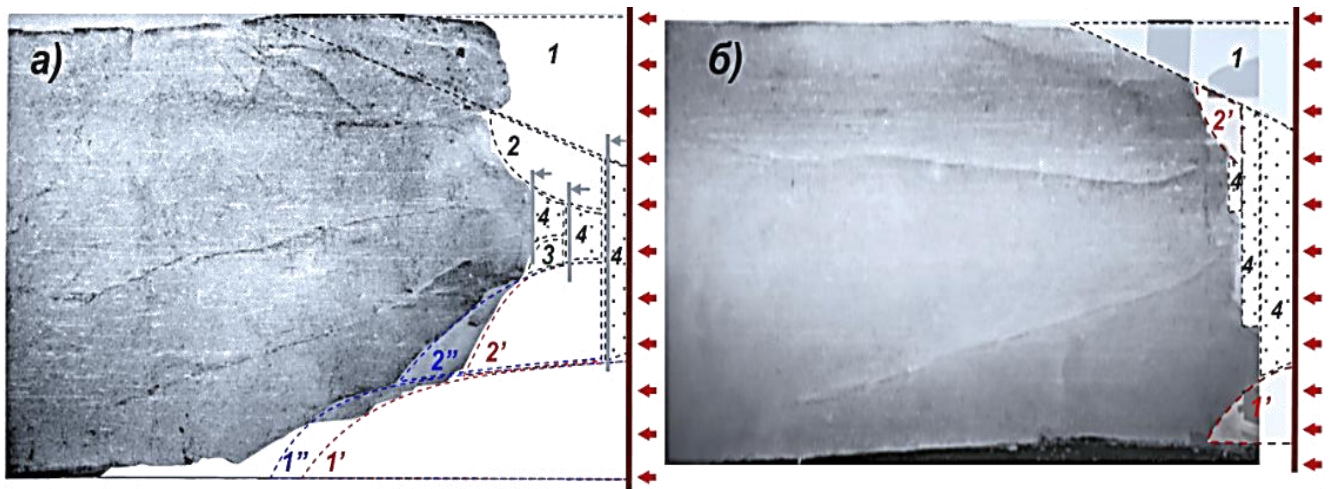


Рисунок 6.2.5 Картины разрушения природного льда при внедрении в него модели цилиндрической опоры: уменьшение «эффективной толщины» сколами (1, 2, 3) боковых блоков–«клиньев» ледового покрова и смятием среднего «клина» (4) при динамическом разрушении а) – «холодного» (-10°C) и б) – «теплого» (-3°C) льда

Было проведено двенадцать экспериментов, наиболее важными результатами которых были данные, **подтвердившие адекватность принятой феноменологической модели развития системы трещин** в месте контакта опоры с кромкой ледового поля. Таким образом, все три модели: феноменологическая, компьютерная информационная и физическая в совокупности их результатов однозначно показали реальный механизм разрушения морского льда на контакте ледового поля с поверхностью цилиндрической опоры гидротехнического сооружения.

Результатами полунатурного эксперимента [117,133] помимо достигнутых целей, являются также два важных вывода. **Первое - характер накопления потенциальной** упругой энергии в объеме льда при его упругом деформировании, как показывает сравнение данных нашего опыта с опытом японских исследователей по медленному (скорость ниже на 2 порядка) вдавливанию модели опоры в лед (Рисунок 5.2.3) остается идентичным в диапазоне реальных скоростей взаимодействия ЛП с МЛО. В качестве второго вывода особо следует отметить, как результат проведенного сравнительного исследования, что **скорость**

взаимодействия льда с преградой напрямую влияет на скорость достижения критических значений этой величины. Следовательно, период разрушения льда зависит от скорости ЛП.

Обобщение известных данных, включая результаты собственных теоретических исследований, физического и численного экспериментов позволили разработать «Классификацию механизмов разрушения кромки ледового поля в зоне контакта и алгоритмов расчета ледовой нагрузки на вертикальные опоры сооружений, представленную на Рис. 15,б.

По данным публикаций того времени и по результатам собственных теоретических и экспериментальных исследований *автором данной работы* была составлена *классификация «основных типов разрушения льда»* [125, 117,370] для их аппроксимации в виде механических моделей в разработке моделей взаимодействия ЛП с МЛС с учетом условий контактной задачи. В этих работах автор предложил блок-схему (Рисунок 6.2.6) вывода формулы для получения расчетного значения контактной силы, действующей на вертикальную опору.



Рисунок 6.2.6 Схемы моделей разрушения льда, отдельно учитывающих типы механизмов разрушения льда на кромке ЛП: путем смятия льда на контакте ЛП с МЛС (учитывается в нормативном документе); путем сдвигов блоков у свободных поверхностей ЛП; комбинации двух типов механизмов разрушения по [125]

Здесь показана не только взаимосвязь типа механизма разрушения льда на контакте с опорой сооружения с его физическим состоянием, но и предложено выполнять комплекс расчетов нагрузки «с использованием положений механики разрушения твердых (поликристаллических) тел (δ зерна $\ll H$) и сдвиговых прочностных характеристик льда — сцепления (C) и коэффициента внутреннего трения ($\operatorname{tg} \phi$)» с тем, «чтобы определить расчетную нагрузку, очевидно, необходимо выбрать меньшую из получаемых для всех возможных расчетных случаев» [125,370].

Детальный анализ результатов физического эксперимента, выполненного под руководством автора [117] по исследованиям механизма разрушения торцевой грани ледового поля путем разрушения больших блоков натурного ледового покрова показал **важную особенность картины разрушения льда** (Рисунок 6.2.5-а): при воздействии на грань «холодного льда» моделью опоры скалывающиеся блоки — «клинья» льда имели криволинейную 3D поверхность скола (обозначены цифрами 1,2,3). Это однозначно указывает на то, что процесс разрушения управляется внутренними физическими механизмами исходя из **принципа минимизации энергозатрат** на разрыв внутренних связей материала.

Теоретическое подтверждение этому появилось в том же 1978 году: D.K.Kendall в статье [257] опубликовал обнаруженный им такой же эффект при испытании на сжатие образцов из разных хрупких материалов (Рисунок 6.2.7 -а), объяснив этот эффект тем, что «**Поверхностная энергия разрушения, а не сила, является фундаментальным свойством материала диктующим образование трещин при сжатии**»... и ... «нужной константой материала для описания растрескивания при сжатии, а не прочности при сжатии. **Эта поверхностная энергия разрушения останется неизменной как при растяжении, так и при сжатии, несмотря на изменения геометрии и режима нагружения**».

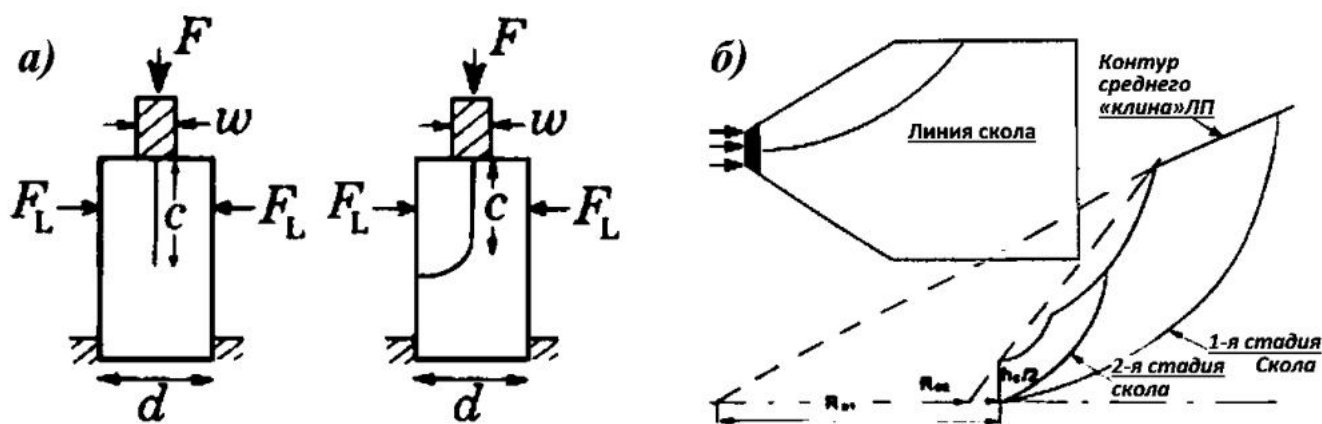


Рисунок 6.2.7 Эксперименты по сжатию образцов по D.K. Kendall [257] и модель скалывания кромки ЛП по Р. Kujala [271]

В 1993 году Р. Kujala в его работе [271] разработал на основе исследований D.K.

Kendall [257] модель разрушения кромки «среднего клина» ледового поля путем «отслаивания» (Рисунок 6.2.7 -б)., в которой Р. Кујала отмечает: *«процесс отслаивания» определяется с использованием криволинейных поверхностей, которые можно сравнить с разрушением сколами, как определено у Kendall (1978) для трещин, растущих параллельно поверхности льда, пока в конечном итоге не выйдут на поверхность для удаления «чипа» ... Практическое применение теории затруднено, поскольку не приведены критерии для сил, необходимых для запуска трещин, т.е. инициирования их распространения».*

Но здесь, вопреки теории Гриффитса о перпендикулярном к продольному усилию растяжения стержня направлении роста трещин, для условий задачи нагружения сжатием грани ограниченного массива типа образца, D.K.Kendall отметил в той же работе [257]: *«Такое поведение в анизотропных твердых телах... не является полностью неожиданным, поскольку трещины там направляются вдоль слабых интерфейсов. В изотропных материалах такое расщепление должно быть менее естественным, так как трещины склонны блуждать к краям образца».* Здесь же D.K.Kendall отмечает, что ... *«...два режима (сдвиг и расщепление – авт.) могли бы работать одновременно, если бы силы оказались равными. Здесь, и это очевидно, режим разрушения должен соответствовать самому малому усилию по мере приложения нагрузки».*

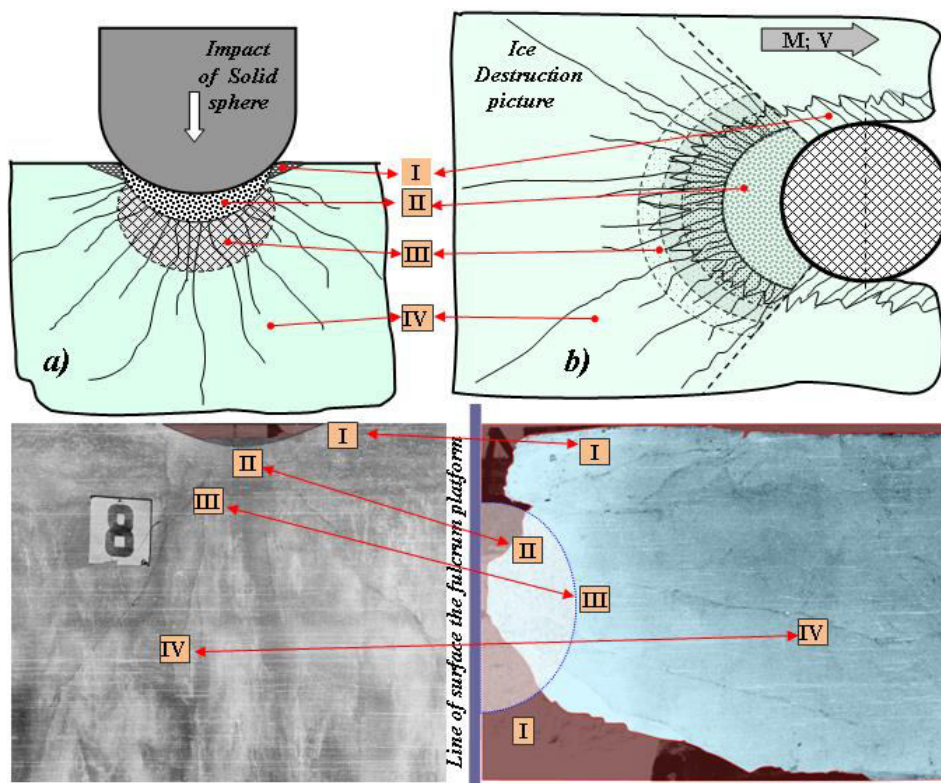


Рисунок 6.2.8 Сравнение типов разрушения льда при внедрении в него стальной сферы и прорезании моделью опоры сооружения ледового поля:

I – зона сколов льда; II – зона всестороннего сжатия; III – зона сплошной трещиноватости; IV – зона магистральных трещин

Здесь подробное цитирование известных механиков в области испытаний образцов [257] и взаимодействия льда с судами выполнено с целью доказательства положительной валидации результатов всех разработанных в этой части диссертации моделей разрушения льда в «рабочей зоне» ледового поля на контакте с цилиндрической опорой. Таким образом, все здесь представленное послужило основанием для **применения энергетического подхода к рассмотрению**, изучению и применению в разработке динамической модели циклической ледовой нагрузки на МЛС на основе анализа всего комплекса явлений разрушения льда в зоне его контакта ЛП с поверхностью МЛС.

Здесь следует обратить внимание на еще одно важное наблюдение: результаты 2-х типов выполненных экспериментов (Рисунок 6.2.8) по внедрению сферических инденторов в поверхность натурального ледового покрова и по воздействию модели опоры на его торцевую грань [369,117], позволяют использовать их в качестве факторов валидации принятых феноменологической и численной информационных моделей, в которых были предсказаны механизмы разрушения льда развитием системы трещин в торце ледовой пластины разной толщины при воздействии на неё цилиндрической опоры сооружения.

Результатами полунатурных экспериментов автора [125,369] (Рисунок 6.2.8), помимо достигнутых целей, являются также ряд важных выводов.

Первый и наиболее общий вывод: всеми процессами разрушения, и в области исследуемых явлений разрушения льда, в частности, «управляет» энергия, как мера движения материи способной производить работу и обладающая свойствами однозначности, конечности, непрерывности и аддитивности. В рассматриваемой замкнутой системе существует закон сохранения энергии, позволяющий вести учет ее расходования на всю работу многими процессами разрушения суммированием «частных энергий». Критерии перехода потенциальной энергии упругого деформирования «частного» объема льда в другие ее виды (поверхностную, тепловую, кинетическую и др.) является критическая удельная плотность упругой энергии, концентрируемой в дефектах и на границах кристаллов льда каждого «частного» разрушаемого объема.

Второй вывод состоит в том, что характер накопления потенциальной упругой энергии в объеме льда при его упругом деформировании, как показывает сравнение данных описанного здесь эксперимента с записью осциллограммы в опыте японских исследователей [222] (см. рисунок 5.2.3 в главе 5) по медленному (скорость ниже на 2 порядка) вдавливанию модели опоры в лед, остается **идентичным в широком диапазоне реальных скоростей** взаимодействия ЛП с МЛС. **Период разрушения** льда обусловлен **скоростью достижения предельного значения критерия разрушения** в напряженных зонах, что напрямую **зависит от скорости ЛП**.

Третий вывод говорит о том, что как **частные процессы разрушения** отдельного вида, так и **процесс разрушения льда в целом** в массиве льда в торцевой грани ЛП в

рассматриваемых масштабных пределах толщины льда и поперечного размера опоры сооружения **подобны: общий стохастический процесс** разрушения средней части ледового «клина» складывается из **частных стохастических процессов** разрушения отдельных блоков – балок льда, заключенных между магистральными вертикальными и горизонтальными трещинами. Это дает основание к принятию **важной гипотезы**, состоящей в том, что в качестве **представительного объема разрушаемого объема льда** необходимо использовать **образец**, геометрически подобный разрушаемым блокам льда в массиве натурального льда для его испытания с начальными и граничными условиям идентичным реальным условиям общего процесса разрушения льда в торцевой части ЛП на его контакте с опорой МЛС. Доказательство данной гипотезы рассмотрены в следующем разделе этой главы.

6.3 Метод получения расчетных значений энергетического критерия разрушения льда динамическими испытаниями образцов из натурального ледового покрова

Выполненные экспериментальные исследования по определению эффективных значений удельной энергии механического разрушения льда методом DBT («падающих сфер» см. предыдущие разделы) не привели к получению гарантий получения однозначных и адекватных реальному процессу значений этой величины, несмотря на кажущуюся простоту метода. Несмотря на полное совпадение признаков, характеризующих механизмы разрушения льда в массиве и на контакте с опорой сооружения (Рисунок 4.5.X), очевидно, что показатель удельных затрат энергии на процессы разрушения льда в двух этих вариантах будет отличаться. В первом случае существенная часть энергии, помимо затраченной на разрушение льда, расходуется на возбуждение как поверхностных волн в ЛП, так и изгибных с преодолением гидродинамического сопротивления воды, что не характерно для решаемой проблемы. Во втором случае, в ледовом покрове помимо энергии, затрачиваемой на разрушение льда на кромке ЛП, «полезную» для разрушения роль играет продольная цилиндрическая волна сжатия-растяжения в плите льда, несущая энергию, которая инициирует развитие и накопление микроразрушений во льду, т.е. создает «зоны предразрушения»

Для достижения основной цели исследования – разработки новой методологии расчета ледовой нагрузки на МЛС с учетом ее циклического характера с применением имитационной модели, основанной на использовании энергетического динамического критерия разрушения льда, необходимо **разработать метод экспериментального определения критерия разрушения ε^*** , не только адекватный условиям и порядку функционирования имитационной модели, но и обеспечивающий его получение адекватным

натурному процессу разрушения льда на контакте с МЛС способом.

Решение этой задачи обеспечит выполнение *физического моделирования развития реального комплексного ПРОЦЕССА* как совокупности ряда частных процессов деформирования и разрушения **натурного морского льда** в зоне контакта ЛП с опорой МЛС на материальной модели в виде *модельного физического ПРОЦЕССА* деформирования и разрушения ТОЛЬКО АДЕКВАТНОГО УСЛОВИЯМ ЗАДАЧИ *представительного объема натурного материала* – образца морского льда.

Поэтому, для достижения решения поставленной задачи по реализации принятой энергетической концепции описания механизма разрушения льда на контакте с опорой сооружения, а также и принятой выше гипотезы¹² с доказательствами ее истинности, в дальнейшем, для получения адекватных реальному процессу разрушения кромки ЛП будет рассматриваться разработанный и запатентованный диссертантом метод ее решения [82,83,84,85], *основывающейся на испытаниях динамическим сжатием больших блоков (образцов) льда*, как *«представительных объемов»* его напряженного массива в зоне контакта ЛП с МЛС, представленный в этом разделе данного исследования.

6.3.1 Законы разрушения кромки ледового поля. Выбор формы и размеров образцов льда, как представительных объемов его массива для определения ε^*

Целью разработки формы и определения обоснованных размеров образцов льда является определения эффективных значений удельной энергии механического разрушения этого материала ε^* в лабораторных условиях при *квазидинамическом* нагружении верхней грани образца жесткой плитой испытательной машины, движущейся *со скоростью соответствующей скорости движения ледовых полей* в реальных условиях района, для которого проводятся исследования с высокой достоверностью получаемых данных, необходимых для проектирования транспортных гидротехнических сооружений, а также сооружений на шельфе замерзающих морей.

Как следует из результатов экспериментов автора по разрушению блоков льда моделью опоры сооружения, идентичных результатам аналогичных исследований других авторов (см. здесь раздел 4.2.3), разрушение льда при движении ледового поля [82,83,84] происходит в локальных объемах льда в виде своеобразных консольных балок прилегающих к зоне контакта путем внешних и внутренних сколов блоков льда, смятия средней части сечения балки на некоторую глубину и выдавливания продуктов разрушения льда

¹² Гипотеза состоит в том, что в качестве *представительного объема разрушаемого объема льда* необходимо использовать образец, геометрически подобный разрушаемым блокам льда в массиве натурного льда
.....

из зоны контакта, что хорошо видно на фотографиях зоны разрушения (Рисунок 4.2.10). Общая картина результата взаимодействия МЛС с торцевой гранью ЛП показана на Рисунке 6.3.1.

Как показали эксперименты по разрушению больших блоков льда, в начале контакта происходят сколы передней грани ЛП (см. № 1 на Рисунке 6.3.2), далее нагружению подвергается выступающая головная часть центрального блока (№2), которая сминается и выжимается из зоны контакта в силу сильной раздробленности хаотически направленными трещинами

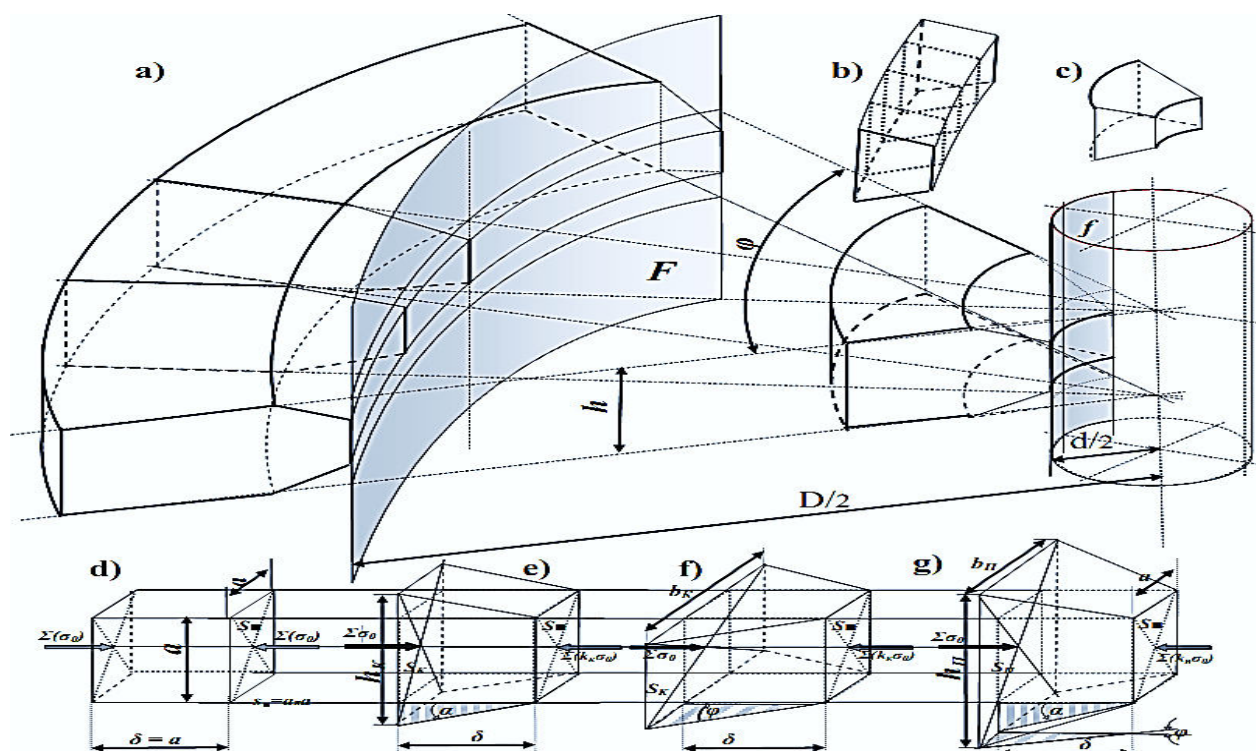


Рисунок 6.3.1 Формирование блоков льда при разрушении торца ледовой плиты

. Далее центральная часть массива льда, расщепленного вертикальными и горизонтальными трещинами на клиновидные и трапециевидные элементы – балки (№3 и №4 на Рисунке 6.3.2), которые разрушаются дроблением с дальнейшим смятием продуктов разрушения и их вытеснением из зоны контакта. После продвижения льдины на некоторое расстояние и последующего уплотнения раздробленного льда контакт восстанавливается, чему соответствует следующее возрастание силы сопротивления льда и последующий сдвиг верхних и нижних блоков следующего цикла разрушения [85].

Ввиду объемного распределения энергии в зоне контакта [82,83,84,133], на некотором расстоянии от опоры сооружения концентрация напряжений в массиве льда в балках ослабевает, напряжения сжатия от действия контактной силы становятся незначительными за счет их рассеяния по длине балки, расширяющейся с удалением от зоны контакта.

В условиях квазидинамического процесса многоциклового локального разрушения от сил сжатия разрушению на некоторую глубину подвергается только «передняя» часть балки (Рисунок 6.3.2), после чего повторяется процесс образования новых вертикальных трещин и роста горизонтальных трещин, образующих все новые и новые балки трапецевидного сечения.

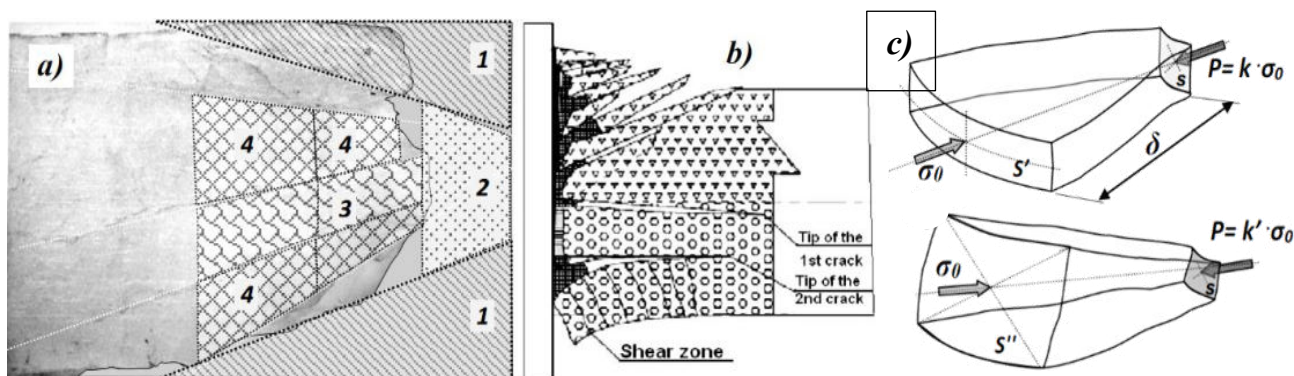


Рисунок 6.3.2 Схема формирования трещин и блоков льда между ними в зоне сжатия торца ледового поля во время динамического контакта с поверхностью цилиндрической опоры: а) – основанные на исследованиях автора ; б) – исследования Karulin E. et al. На Шпицбергене, 2013; в) типичные формы блоков льда образованных системой вертикальных и горизонтальных (кольцевых) трещин

Поэтому основным недостатком всех известных образцов льда, применяемых для испытаний его на сжатие, с точки зрения использования их формы, размеров и их соотношений, являются ограниченные размеры таких образцов, не позволяющие моделировать в них картину локальной концентрации напряжений только у одной из нагружаемых граней, отчего такие образцы находятся в объемном напряженном состоянии.

Исходя из объективно наблюдаемой аналогии форм «клиновидного» элемента, заключенный между параллельными кольцевыми горизонтальными трещинами и «трапецевидного» элемент (усеченная пирамида), образованный радиальными вертикальными и радиальными горизонтальными трещинами, (Рисунок 6.3.2) были разработаны формы и размеры образцов льда для выполнения их испытаний на динамическое сжатие, а также определенные соотношения размеров таких образцов, что детально описано в патентах [82,83,84]. Размеры основания образцов должны быть в 1,12–2 раза больше наименьшего размера верхней плоскости, а высота образца составляет 2,5–4,0 наименьшего размера его основания.

Поэтому автором были разработаны и запатентованы такие формы и размеры образцов [82,83,84,85], которые должны были соответствовать «натурным трапецевидным консольным балкам», защемленным своими «дальними концами в массиве льда ЛП (Рисунок 6.3.3). Задачей этих изобретений было обеспечение адекватности исследуемого

явления разрушения льда в опыте реальному процессу, и точности эффективных значений получаемой величины удельной энергии механического разрушения льда, соответствующих квазидинамическому процессу многоциклового локального разрушения его массива, при воздействии ледяного поля на опору сооружения.

Эти формы и размеры образцов, согласно проведенным тестовым экспериментам [85], обеспечивают устойчивый процесс механического разрушения его верхней части в виде спонтанно повторяющихся и чередующихся сколов боковых участков в зоне контакта образца с жесткой поверхностью плиты пресса, смятием в средней части его рабочего контакта и выжиманием продуктов разрушения льда из контактной зоны.

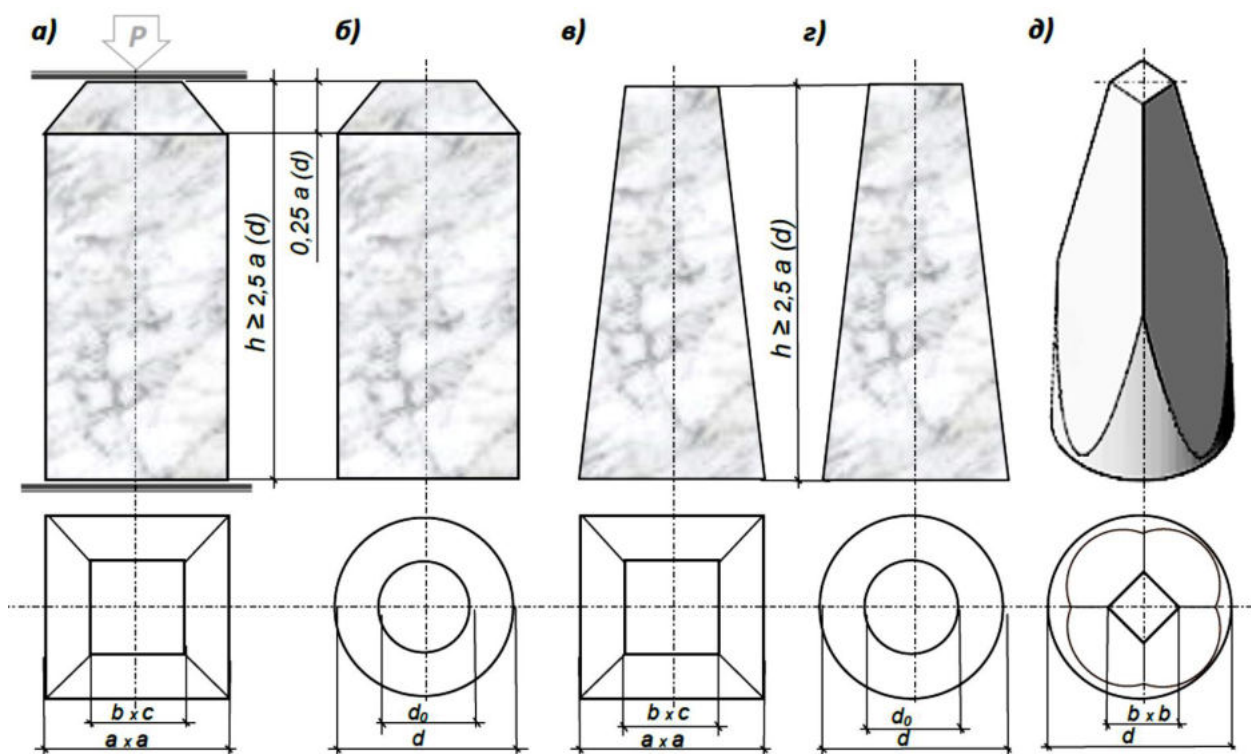


Рисунок 6.3.3 Формы и размеры образцов для экспериментального определения удельной энергии механического разрушения льда по диаграммам «Сила-деформация» при их испытаниях на сжатие по [82,83,84]

По набору видов разрушения и характеризующих их параметров процесс испытания образца динамическим сжатием аналогичен реальному процессу взаимодействия ледового поля с опорой сооружения, что зафиксировано видеосъемкой и инструментальными записями кривой «сила-перемещение» с использованием тензометрического измерительного комплекса с записью всех параметров на персональный компьютер. Далее в шестой главе выполненная валидации по параметру «частота разрушения» это подтверждается.

6.3.2 Метод испытания крупных трапецевидных и конических образцов льда на испытательной машине

Разработанный диссертантом [85,128] метод определения эффективных значений удельной энергии механического разрушения для их использования в имитационной модели расчета параметров цикличности ледовой нагрузки от ЛП на МЛС в качестве критерия разрушения состоит в следующем.

Образец размещается между плитами испытательной машины *Shimadzu AG100kNXplus* (Рисунок 6.3.4, а), имеющей неизменную в процессе испытания образца, но регулируемую скорость перемещения нагружающей плиты. Нагружение осуществляется перемещением верхней плиты с постоянной скоростью 1; 2; 2,5; 3; 5 mm/S [85], с фиксацией предельных значений его упругой деформации dh и, соответствующей предельной упругой контактной силы P_k , с автоматическим определением полного значения затраченной на разрушения энергии U^* . Перед процессом испытаний определяется плотность льда, во время испытания непрерывно регистрируются предельные изменения высоты разрушаемой части образца льда и предельной контактной силы.



Рисунок 6.3.4 Испытательная машина (а), регистрирующая процесс скоростная камера (г) и примеры образцов пресного (б) и морского (з) льда

Призматический или цилиндрический образец с «нестандартно» более высоким отношением поперечного размера его сечения к высоте, чем для рекомендуемого нормативным документом значения 1:2,5, и со снятыми кромками верхней торцевой грани в виде усеченных конуса или пирамиды на высоту не более 0,25 размера поперечного сечения подвергается испытанию воздействием на его верхнюю грань жесткой плиты испытательной машины. При этом процесс механического разрушения верхней части образца сопровождается спонтанно повторяющимися и чередующимися сколами боковых участков в зоне контакта образца с жесткой поверхностью плиты пресса, смятием в средней части его рабочего контакта и выжиманием продуктов разрушения льда из контактной зоны. В процессе испытания производится инструментальная запись параметров процесса (Рисунки 6.3.5 и 6.3.6), ведется видеосъемка, фотографирование и обмеры результатов. Это аналогично параметрам реального процесса взаимодействия ЛП с опорой сооружения по набору видов разрушения и параметрам характеризующих все явления в таком процессе.

6.3.3 Метод расчета эффективных значений удельной энергии механического разрушения льда по данным испытаний больших образцов

Методика обработки результатов испытаний образцов для экспериментального определения удельной энергии механического разрушения льда ε_{cr} в лабораторных условиях при *квазидинамическом многоцикловом* нагружении образца льда с высокой достоверностью и получаемых данных, необходимых для проектирования сооружений для шельфа замерзающих морей состоит в следующем.

Предельное значение упругой контактной силы, зарегистрированных в процессе испытания, которые описывают процесс разрушений только в подлежащей разрушению части образца (Рисунок 4.5.5), или удельную энергию разрушения вычисляют по формуле

$$\varepsilon^* = \int_0^{\Delta h} P(h) dh / a^2 \cdot \Delta h \cdot \rho, \quad (6.3.1)$$

где ε^* - эффективное значение плотности удельной энергии разрушения льда; Δh – разрушенный участок образца; $P(h)$ – текущее значение контактной силы, разрушающей лед в образце; a^2 – площадь основания образца; ρ – плотность льда.

Технический результат, получаемый при решении поставленной задачи [85] выражается в том, что в процессе лабораторных испытаний обеспечивается соответствие механизма разрушения льда в испытываемых образцах механизму разрушения льда на контакте с опорой гидротехнического сооружения и тем самым обеспечивается возможность получения в лабораторных условиях достоверных результатов определения энергетических характеристик разрушения льда, необходимых для проектирования транспортных гидротехнических сооружений, а также сооружений на шельфе замерзающих морей.

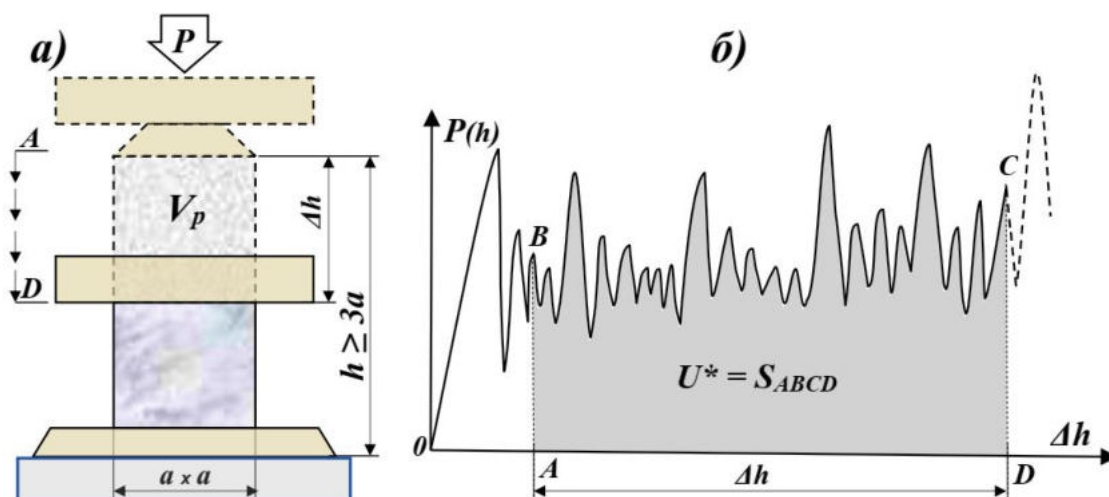


Рисунок 6.3.5 Метод экспериментального определения эффективной плотности удельной энергии разрушения льда путем испытания образца сжатием

Из процесса разрушения льда, протекающего по схеме, приведенной на Рисунке 6.3.5 составлением уравнения энергетического баланса можно получить количественное описание *удельной энергии* $\mathcal{E}^*$, которая расходуется как на *сдвиг, так и на дробление, расщепление, смятием, плавлением и т.д. одного единичного объема льда*. Это значение в общем виде может быть определено следующим образом:

$$\varepsilon_{cr1} = S \int_0^{\delta_1} p_1 \cdot d\delta / W_1, \quad (35)$$

где S - суммарная площадь плоскостей разрушения по типу 1; W_1 - объем разрушенного (сдвинутого) льда. по типу 1.

Входящие в эту формулу параметры нельзя высчитать теоретически, поскольку на процесс разрушения имеют влияние как условия, при которых происходит взаимодействие, так и свойства льда [85,128]. В силу уникальности текстуры (пористости, солёности) и структуры льда (размеров и расположением кристаллов и пр.), зависимости его физико-механических свойств, таких как угол внутреннего трения, сцепление от температуры, как было показано в первой главе, механизмы его разрушения различны и для этого требуется разное количество затрат энергии. Важными факторами также являются как размеры разрушаемого массива (блока, образца) льда в соотношении с размерами воздействующего тела, так и скорость развития напряжений в массиве нагружаемого пространства льда.

Теоретически сложение всех энергий в общую энергию U^* и деление ее на полный объем разрушенного образца, что может дать некоторое среднее значение удельной энергии $\mathcal{E}^*$ – выполнить невозможно. Но это возможно сделать с помощью рассмотренного здесь экспериментального метода, предложенного автором.

Таким образом, для возможности экспериментального определения удельной

энергии механического разрушения льда $\mathcal{E}_{cr}$, точнее ее «эффективного» значения $\mathcal{E}_{cr}^*$, которое будет характеризовать осредненные удельные затраты энергии на разрушение какой-то части объема W^* блока льда (заключенного между магистральными трещинами), это значение необходимо определять по формуле (4.5). Эта формула позволяет ее рассматривать как *теоретическое обоснование удельной эффективной энергии механического разрушения морского льда $\mathcal{E}_{cr}^*$* при проведении раздавливания блоков льда типа образующихся в натуральных условиях балок трапециевидного вида. *Что позволит при использовании ее экспериментальных значений производить расчеты ледовой нагрузки на опоры МЛС.*

6.3.4 Результаты испытаний крупных трапециевидных и конических образцов льда динамическим сжатием

В работах автора, в т.ч. с соавторами [126,124,125,127,368,371,366,367,369,129] показаны результаты исследований, в том числе и исследований, выполненных под руководством автора в 2016 – 2018 г.г. в лаборатории ледовых исследований Дальневосточного федерального университета.

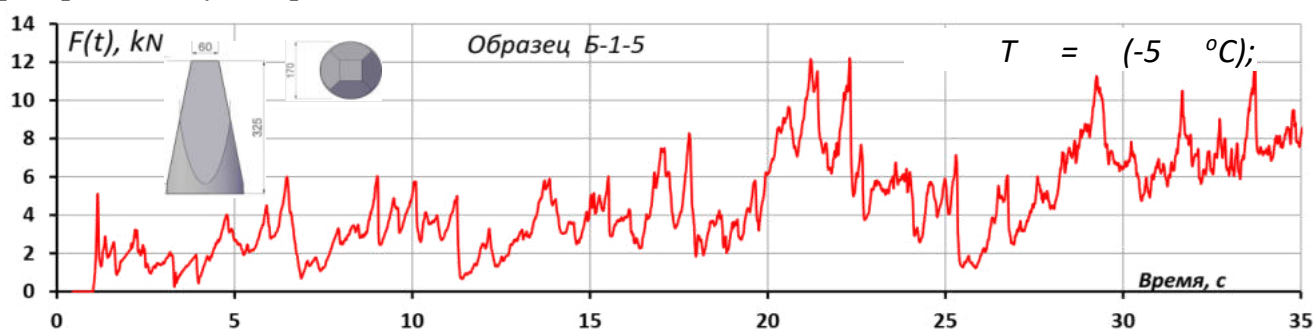


Рисунок 6.3.6 Цифровой ряд регистрации параметров процесса разрушения образца морского льда динамическим сжатием в лаборатории

Инструментальная запись параметров циклического процесса разрушения льда в лабораторном исследовании автора практически идентична таким записям силы ледового давления на реальных ледостойких сооружениях, полученными многими исследователями (Рисунок 6.5.3), выполнявшими регистрацию параметров процесса взаимодействия ЛП с сооружениями.

Лабораторное исследование [126,124,125,127,368,371,366,367,369,129] процесса разрушения физической модели центрального блока ледового покрова в виде высокого образца льда трапециевидной или цилиндрической формы (Рисунки 6.3.3 – 6.3.8) подтверждают гипотезу о критерии разрушения – о послойном разрушении льда по описанному здесь механизму, формирующем циклы нагрузки: формирование слоя предразрушения;

растрескивание слоя на мелкие блоки и их смятие; вытеснение продуктов разрушения (крошки льда) из зоны контакта; частичные большие сколы граней до половины поперечного размера блока льда и резкое уменьшение площади контакта; быстрое продвижение индентора вперед и формирование следующего слоя предразрушения в виде растрескивания массива на некоторую глубину множеством хаотично направленных трещин (Рисунок 6.3.7-г).

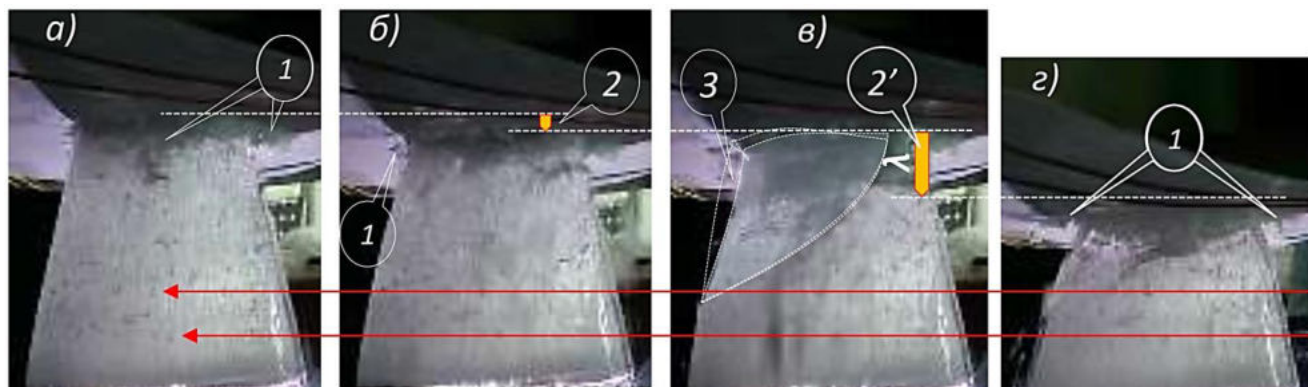


Рисунок 6.3.7 Стадии процесса послойного контактного разрушения льда: а, б) – формирование слоя предразрушения; б, в) – процесс мелких сколов, дробление льда трещинами, смятие и выдавливание крошки (1) из зоны контакта; в, г) – достижение жесткого контакта и образование сколов, углубление на толщину слоя λ (2)

Этапы процесса послойного разрушения льда на контакте с жесткой опорой по экспериментам Цуприка В.Г. [128] на больших образцах показан на Рисунке 6.3.7-а-в: процесс формирования слоя предразрушения льда с постепенным смятием его слабых участков и выдавливанием крошки за пределы контакта (показано цифрами 1); на фото в) показан момент образования сколов (цифра 3) боковых граней блока льда в результате достижение жесткого контакта. После этого цикла начинается формирование слоя предразрушения следующего цикла разрушения. Приведенные на Рисунках 6.3.7 и 6.3.8 фотографии демонстрирует **ЧЕТЫРЕ ГЛАВНЫХ элемента комплексного процесса разрушения льда на кромке ЛП**: слой предразрушения льда – на рисунке выше; следы ступенчатых микросколов льда (стрелки 1 и 2 на фотографии - Рисунок 6.3.8-а), а также формирование трещины, расщепляющей блок льда на 2 элемента, что можно видеть на Рисунке 6.3.8-б) и в).

Явление «расщепления» плиты льда по толщине на слои [126,124,125,127,368,371,366,367,369,129] происходит постоянно в процессе взаимодействия ЛП с МЛС в результате впрессовывания продуктов измельчения льда от «внутренних» сколов (направленными внутрь площадки контакта) в образовавшуюся трещину чистого растяжения (Рисунок 6.3.9 -б,в) сформировавшуюся в начальной стадии в массиве льда вблизи контактной площадки и непрерывно – опережающе «проникающую» вглубь массива ледовой плиты, что и показано на указанном рисунке.

Четвертый «главный» элемент, показан в слое микроразрушений, сформировавшемся непосредственно под поверхностью нагружающей плиты, на Рисунке 6.3.8-г. Здесь в крупном масштабе видны расслаивающиеся вертикальные «столбики» льда, верхними частями вмерзшие в смятую крошку льда, замерзшую после остановки нагрузочной плиты заново в перекристаллизовавшуюся структуру льда. Поэтому можно однозначно утверждать о том, что граница, отделяющая разрушенный слой льда (деструктурированный слой) от его массива с ненарушенной структурой, реально имеет место в природе и это не монотонная кривая, тем более – не прямая линия.

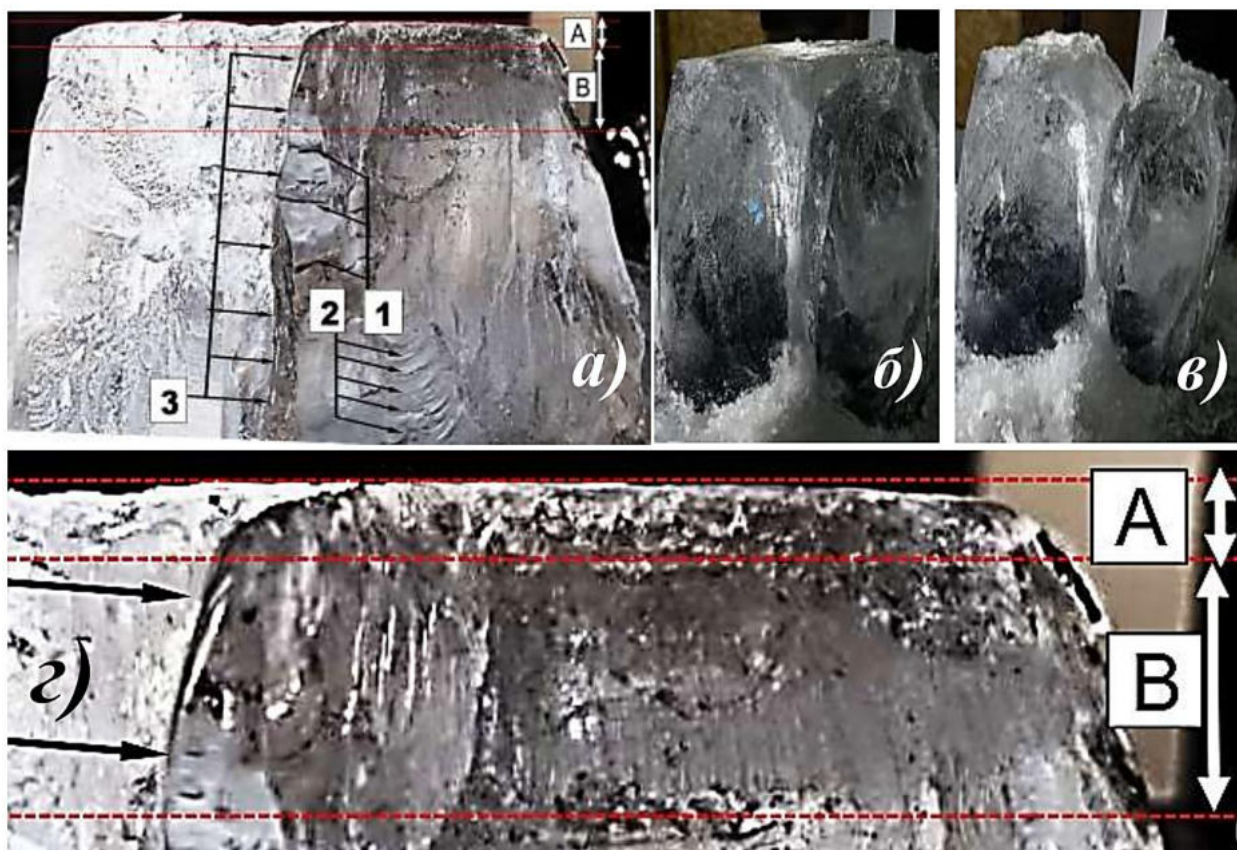


Рисунок 6.3.8 Механизмы послойного разрушения среднего блока ледовой плиты (а – в), сколов и микросколов на поверхностях блока льда (1 и 2 на фото а), а также развития расщепляющей ледовую плиту трещины (3 на рисунке а)

Диаграмма «Сила-перемещение» испытания образца льда по новому методу (Рисунок 6.3.9) графически отображает описанные выше «частные» процессы разрушения льда на контакте с опорой МЛС. Она по виду идентична таким записям ледовой нагрузки, записанной на ледостойких сооружениях в течение многих лет разными исследователями в реальных условиях на море и в лабораторных условиях (Peyton, 1966 [322], Афанасьев и др., 1971 [9]; Croasdale, 1975 [171]; Hyrayama et al., 1975 [222]; Schwarz, 1975 [336]; Maattanen, 1978[281]; Bekker et al., 1987 [157]; Yue et al., 1998 [382]; Frederking et al., 1999 [197]; Kärnä, et al., 2003, 2006 [250,]; Jordaan et al., 2006 [239]; Karulin et al., 2014 [255]; Вершинин и др. 116]: Sodhi et al. [344]).



Рисунок 6.3.9 Диаграмма временного цифрового ряда записи процесса послойного разрушения льда на контакте с жесткой опорой

Диаграмма Рисунка 6.3.9 в параметрах «сила-перемещение» показывает повторяющиеся циклы появления «зон высокого давления» (1) и дробление льда в них с последующим смятием осколков (от цифры 3 вправо вверх), уменьшение толщины смятого слоя льда с вытеснением крошки, возвращением жесткого контакта с целиком льда, ростом контактной силы и резким сколом боковых граней (2). Как уже отмечалось ранее многими исследователями и это видно из приведенных на Рисунках 6.3.7 и 6.3.8 результатов экспериментов, этот процесс имеет выраженный комплексный характер и включает затраты энергии на такие процессы как: зарождение и развитие трещин сдвига и нормального отрыва, сколов, смятия, экструзии и спрессовывания с плавлением льда в пограничном слое и замерзанием воды в ослабленных от давления зонах.

Поэтому удельная энергия механического разрушения льда ε^* в данном случае **есть комплексная физико – механическая характеристика**, в значении которой заключен интегральный эффект всех видов разрушения при затратах энергии на условную среднюю единицу объема или массы льда. Поэтому получаемые значения параметра комплексной природы, определяемого для описания процессов контактного разрушения льда следует считать **эффективными значениями для такого процесса**, их не следует путать со значениями предельных значений *плотности упругой энергии в исследованиях моноразрушения по типу чистого сдвига или растяжения*. Элементы таких явлений можно наблюдать на Рисунке 6.3.10, что показано ниже.

На Рисунке 6.3.11 показано, что часть **энергии испытательной машины** U_{cr} , передаваемой образцу его плитой, упруго накапливается в некотором слое льда λ под ее поверхностью (Рисунок 6.5.1- з) и в каждый момент времени эта затраченная энергия характеризуется **значением работы** A_{cr} , (Рисунок 6.3.12), совершаемой контактной силой на пути движения плиты пресса до момента разрушения льда. Потенциальная упругая энергия U_{cr} , затраченная на разрушение льда в образце, равна **работе** A_{cr} , которая определяется площадью под диаграммой $F(l)$, как показано на рисунках 6.3.10 и 6.3.11).

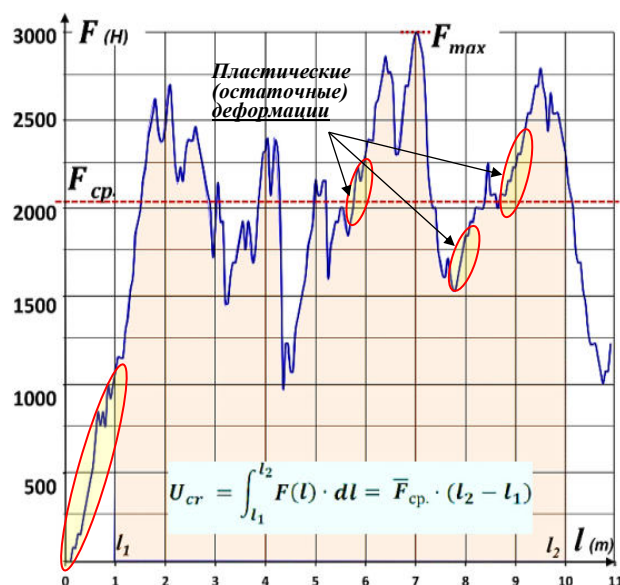


Рисунок 6.3.10 Определение энергии разрушения льда по диаграмме силы давления ЛП на опору МЛО

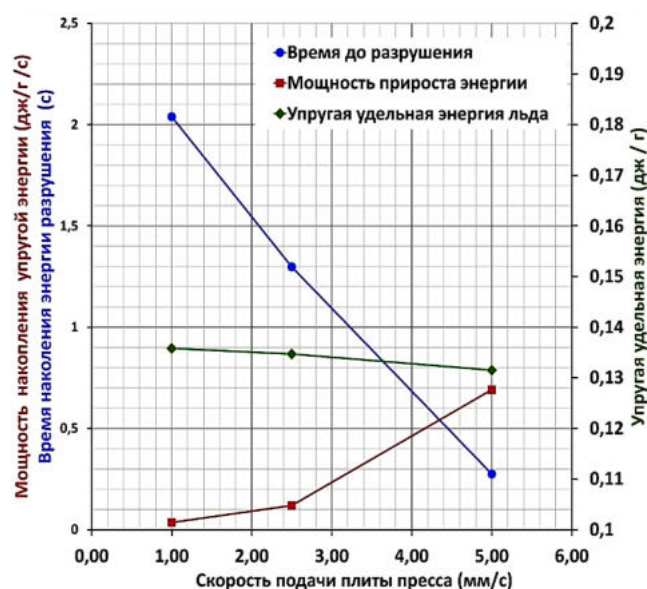


Рисунок 6.3.11 Изменения мощности и времени накопления упругой энергии в слое льда до его критического уровня в целике льда ϵ_{cr}

Каждое испытание блока льда динамическим сжатием (Рисунки 6.3.67 – 6.3.12) дает возможность определения как осредненного (эффективного) значения удельной энергии разрушения льда ϵ_{cr}^* , так и **критического значения удельной энергии** разрушения слоя «целика» льда – ϵ_e . Первый параметр определяется отношением работы разрушения U_{cr} всего участка образца льда на его длине $(l_2 - l_1)$ (Рисунок 6.3.10) к массе разрушенного льда M_{cr} , второй – отношением энергии одного из прямолинейных участков упругого сжатия слоя льда (X и Y – рисунок 6.3.10) до точки сброса накопленной упругой энергии – к массе льда, рассчитанной по скорости плиты пресса, размерам образца и отрезку времени упругого сжатия. Согласно выполненным в рамках диссертационного исследования, **значения эффективной (интегральной) удельной энергии хрупкого разрушения ϵ_{cr} в 3-4 раза превышает значение предельной плотности упругой энергии в объеме** нагруженного слоя льда – «чистой» упругой энергии его хрупкого разрушения ϵ_e (Рисунки 6.3.11).

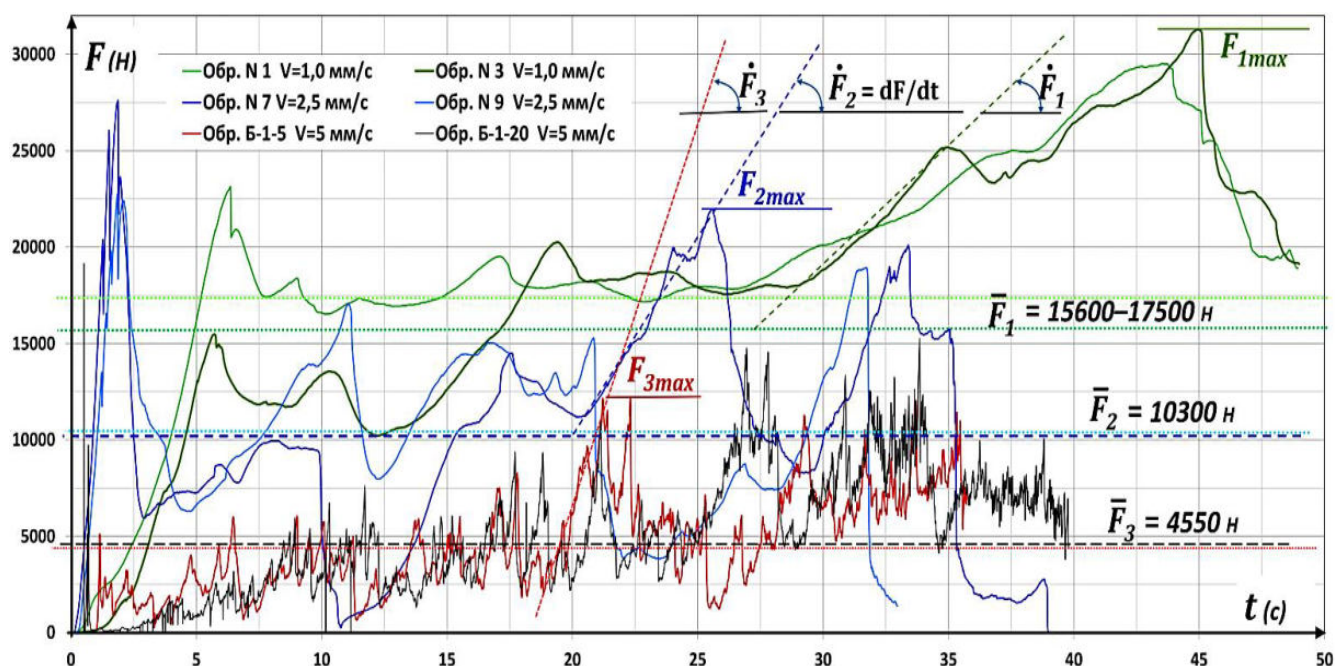


Рисунок 6.3.12 Примеры диаграмм разрушения цилиндрических образцов льда 12,5 х 40 см, при температуре $(-3) \sim (-6)^{\circ}\text{C}$ при различной скорости подачи плиты пресса

На рисунке 6.3.12 даны диаграммы разрушения образцов с разной скоростью нагружения $\dot{F}_i$, характеризующие не только различия механизмов разрушения льда, но и различные уровни контактной силы $\bar{F}_{\text{ср}}$ и F_{max} .

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что диаграмма разрушения образца – это и есть представление функционирования имитационной модели локального разрушения льда на торцевой грани ЛП на контакте с опорой МЛС

6.3.5 Результаты экспериментов по определению численных значений энергетического критерия циклического разрушения льда и их анализ

На Рисунке 6.3.13 приведена зависимость ε^* от температуры идентичная виду такой зависимости для этой величины, полученной автором с соавторами в 1970-80х годах методом Drop Ball Test (DBT) [119,116], но ее численные значения в данном случае на порядок меньше, чем полученные в экспериментах с падающими сферами [112,114,116,119] многими исследователями. В 1984 году такое же расхождение было отмечено в работах Sodhi et al. [341,342,], в которой эти исследователи определяли удельную энергию разрушения льда в экспериментах по моделированию прорезания модельного ледового поля в ледовом бассейне.

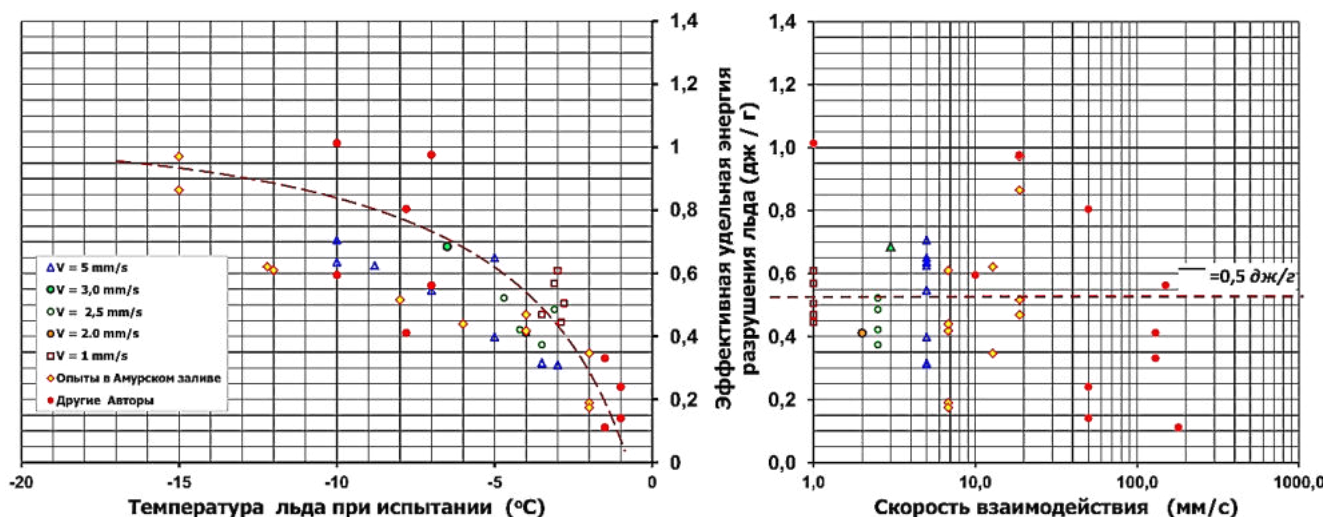


Рисунок 6.3.13 Влияние температуры льда (а) и скорости воздействия индентора (б) на численные значения эффективной удельной энергии его разрушения при температуре $(-3) \sim (-6)^\circ\text{C}$

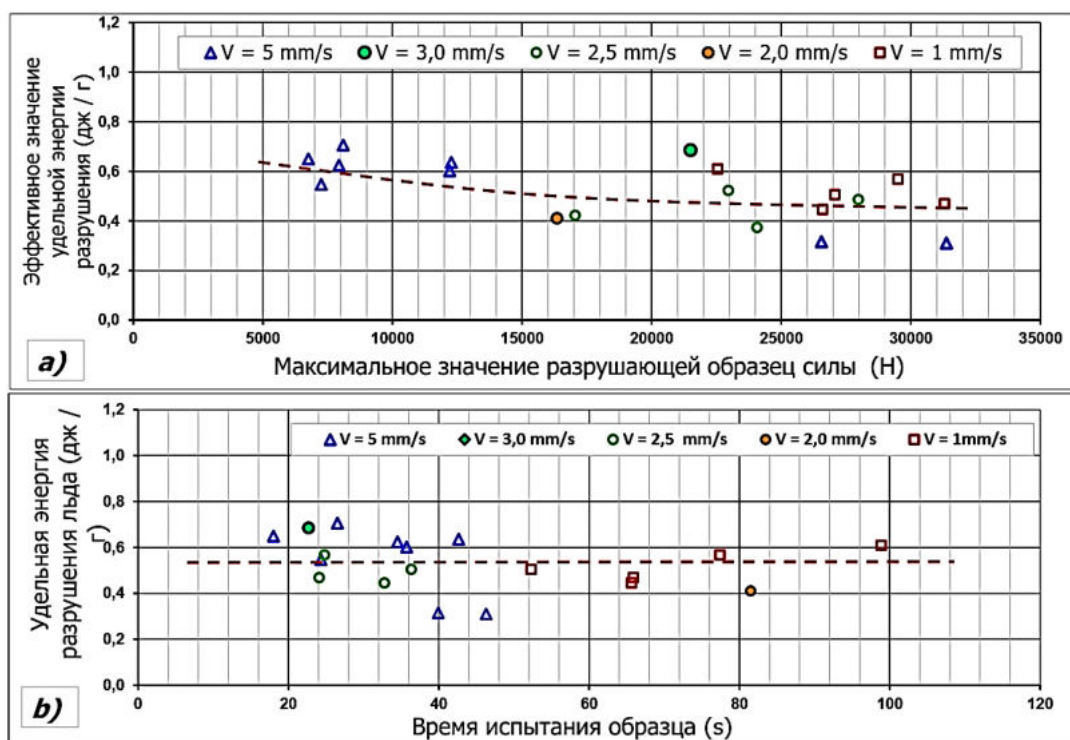


Рисунок 6.3.14 Диаграммы зависимости эффективного значения удельной энергии разрушения образца льда ϵ^* от максимального значения разрушающей силы (а) и от скорости деформирования образца (б)

Из данных, приведенных на Рисунке 6.3.14 -а, можно сделать вывод, подтверждающий известное наблюдение, полученное ранее в полевых и лабораторных экспериментах: когда образец льда или ледовое поле деформируется на высоких скоростях, контактные силы имеют меньшие значения, чем при деформации на низких скоростях. Из Рисунка 6.3.14-б следует, что уровень энергии, который требуется для разрушения льда, слабо зависит от скорости деформации.

Результаты обработки нескольких десятков экспериментальных диаграмм сжатия образцов льда (Рис. 6.5; 6.6; 6.7), в том числе их участков с упругим деформированием льда между актами разрушения его отдельных слоев однозначно **подтверждают истинность основных следствий** принятой нами в конце раздела 6.2 *гипотезы*¹³ в приложении ее к МЛС:

- 1) о **циклическом разрушении льда** (ф. 4.2) при неизменной скорости воздействующего на него сооружения (Рис. 6.3 – 6.7);
- 2) о проявлениях пластического деформирования льда в процессе накопления упругой потенциальной энергии в его объеме (Рис. 6.5);
- 3) о зависимости **времени нагружения слоя льда** (определяемого отношением удельной упругой энергии, затраченной на разрушение льда к **мощности накопления этой энергии в слое льда**) до его предельного упругого состояния ϵ_e от скорости ЛП, но
- 4) о **стабильности** этой величины при различной скорости взаимодействия льда с сооружением (Рис. 6.8, б); 5) о зависимости **критического значения плотности упругой энергии** льда ϵ_{cr}^* от его физического состояния, описываемого температурой (Рис. 6.8, а),

Выводы по разделу.

Основным критерием определения адекватности разработанного метода, как и результатов определения исследуемой величины ϵ^* является когерентность, требующая согласованности, взаимосвязанности новых результатов с известными, ранее оценёнными как абсолютно достоверные для такого рода процессов и явлений. Полученные в эксперименте диаграммы «Сила-перемещение» испытания образца льда по новому методу (Рисунки 6.3.7; 6.3.10 и др.) по основным характеристикам процесса и виду (времени и вида стохастического процесса, характеру повышения упругой силы и ее «сбросу») идентичны таким записям ледовой нагрузки, записанной на ледостойких сооружениях многими исследователями в реальных условиях на море и в лабораторных условиях [163, 180, 221, 232, 322, 324, 378, 387].

Следует также подтвердить, что предлагаемая форма и размеры образца позволяют определять удельную энергию механического разрушения льда ϵ_{cr} при скорости его нагружения соответствующей скорости дрейфа ЛП и в условиях реализации *многоциклового разрушения* части образца льда, как удельные *интегральные затраты* энергии на работу *сдвиговых и сжимающих деформаций*, так и на работу, расходуемую на *выжимание продуктов разрушения* льда из зоны контакта.

¹³ Гипотеза состоит в том, что в качестве *представительного объема разрушаемого объема льда* необходимо использовать образец, геометрически подобный разрушаемым блокам льда в массиве натурального льда
.....

Таким образом, можно считать, что цели эксперимента достигнуты, выдвинутая *гипотеза*¹⁴ **полностью доказана**: предлагаемый способ испытания больших образцов динамическим сжатием позволяет определять эффективные значения удельной энергии механического разрушения льда ε^* при скорости его нагружения соответствующей скорости дрейфа ледового поля и в условиях реализации *многоциклового разрушения* части образца льда, как *удельные интегральные затраты* энергии на работу *сдвиговых и сжимающих деформаций*, так как и на работу, расходуемую на *выжимание продуктов разрушения* льда из зоны контакта. Это дает основание считать ε^* критерием циклического разрушения морского льда.

6.4 Метод определения расчетных параметров цикличности динамической ледовой нагрузки

Как показано в начале главы, для решение исследуемой проблемы, завершающей задачей является **определение двух основных физических параметров**, описывающих циклическое разрушение льда: *максимальное расчетное значение силы* контактного давления льда на опору МЛС и *период появления этих максимальных значений*. Основываясь на результатах всех проведенных работ здесь представлено решение проблемы.

Математическое описание условия начала разрушения льда, являющееся заключительной стадией его деформирования, имеет не только большое теоретическое значение для этого уникального материала, но и *практическое значение для решения рассматриваемой в этой работе проблемы ледовых нагрузок*. Из выводов предшествующего раздела следует, что *силу давления льда на сооружение, т.е. ледовую нагрузку* на него нужно определять из *условий разрушения льда*.

Прежде всего, исследуются условия и параметры, которые должны входить в расчетную формулу *предельного энергетического баланса упруго напряженного объема льда* W_{cr} (Рисунок 6.4.1-а), вызывающие разрушение наиболее напряженной его части, т.е. очередного слоя льда $\Delta_i = k \cdot L_{cr}$.

В соответствии с принятой имитационной моделью послойного разрушения льда на контакте с опорой (см. главу 5 и Рисунок 6.4.1-б), энергетический баланс в системе обеспечивается равенством части кинетической энергии ЛП, затрачиваемой на разрушение льда, работе текущего среднего значения контактной силы $\bar{F}_i$ на пути δ_i движения ЛП:

$$\bar{F}_i \cdot \delta_i = \varepsilon_i^* \cdot D \cdot h \cdot \Delta_i \cdot \rho \quad (j); \quad (6.4.1)$$

¹⁴ Гипотеза состоит в том, что в качестве *представительного объема разрушаемого объема льда* необходимо использовать образец, геометрически подобный разрушаемым блокам льда в массиве натурального льда
.....

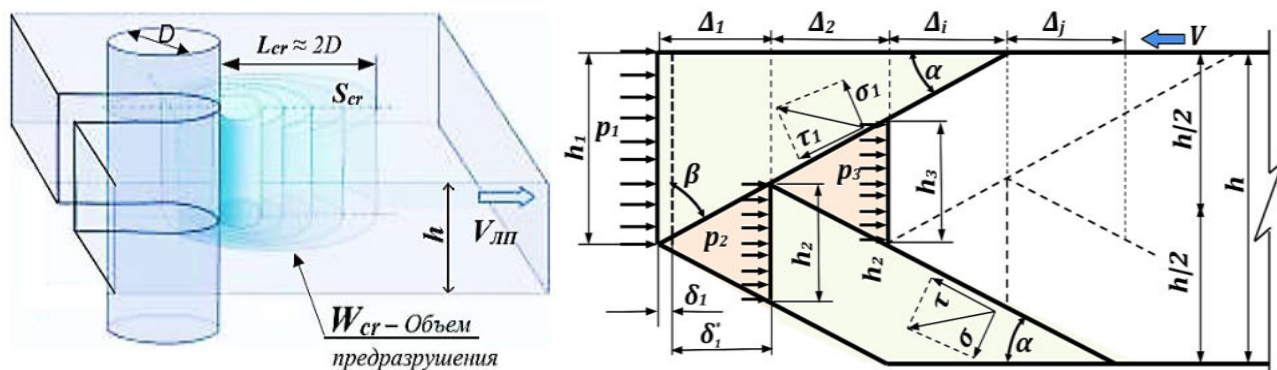


Рисунок 6.4.1 Напряженный объем льда в зоне контакта ЛП с МЛЮ» и фрагмент имитационной модели автора по контактному разрушению льда

Здесь, также *следуя принятой модели послойного динамического разрушения льда* в контактной зоне ЛП с МЛС, *нельзя применить операцию простого интегрирования* для получения среднего значения контактной силы *на отрезке длины прорези ΔL* по причине «перехода границы (фронта) разрушения» от одного слоя к другому и в процессе длительного прорезания ЛП опорой МЛС. Это связано с тем, что в принятой модели рассматривается **комплексный процесс послойного разрушения льда**, когда **типы механизмов разрушения льда меняются** при продвижении фронта разрушения в глубину ЛП.

Скалывание (сдвиги мелких и крупных сколов) требует на единицу поверхности разрушения меньших затрат, чем на развитие **трещины прямого растяжения**, что было показано рядом исследователей и приведено здесь в предыдущем разделе. Но суммарное значение упруго высвобожденной энергии, вызывающей хрупкое разрушения в примерно от 50 до 100 раз меньше объема энергии, затрачиваемой **на смятие и экструзию**, что показано в специальных исследованиях Jordaan & Timco [241]. Очевидно, что **значения удельных энергий разрушения в разных механизмах разрушения льда будут различны**. Это становится понятным при рассмотрении комплексного процесса как набор «частных».

Согласно принятой модели (Рисунок 6.4.2), *выбранной на основании наших и других экспериментальных и теоретических исследований*, разрушение льда перед сооружением вертикального профиля *происходит неравномерно и хаотично* по площади контакта, при *случайном повторении характерных явлений*, подчиняющихся закону нормального распределения. На некотором текущем этапе, после скола блока 1* (Рисунок 6.4.2-а), лед в слое Δ_1 упруго сжимается при нагрузке по контакту на величину δ_1 под действием давления от его «дальнего поля» p_1 . При накоплении критической плотности упругой энергии $\mathcal{E}_e$ в слое Δ_1 под углом α к верхней поверхности плиты из дефекта структуры или включения, случайного расположенных в массиве льда, спонтанно развивается трещина сдвига (требующая значительно меньших энергозатрат из-за влияния свободной

границы), отделяющая от массива блок **1**. Это приводит к резкому падению нагрузки и ее перераспределению на кромке средней части плиты **2** высотой h_0 . Здесь также, при достижении эффективной для этого слоя льда критической плотности упругой энергии до значения $\mathcal{E}_{cr}$, развиваются менее масштабные сколы боковых поверхностей этого участка и развитие трещин в его центре (по Рисунок 6.4.1 и 6.4.2) с последующим смятием кромки льда на величину Δl до момента, когда вертикальный размер контакта достигнет значения h_1 . Затем, при постоянной скорости дрейфа ЛП в очередном слое льда Δl_2 вновь накапливается упругая энергия до критического значения, постоянного для этого типа льда и его температуры – $\mathcal{E}_e$, достаточного для реализации сдвига очередного объема льда *произвольного объема 3*, но в сторону нижней поверхности плиты. Следующий цикл – достижение критического значения плотности упругой энергии $\mathcal{E}_{cr}$, эффективной для средней части плиты **4**.

Процесс повторяется при одновременно–последовательном проявлении на площади контакта сдвигов и раздавливания на участках *случайной длины внедрения опоры A_i и B_i* и с характерными для них, но *разными по природе и по величине значениями $\mathcal{E}_e$ и $\mathcal{E}_{cr}$* . Поэтому частота разрушения льда $f_i = 1/\Delta t_i$ будет различаться на каждом отрезке продвижения ЛП, движущегося с постоянной скоростью $V_{ЛП} = dL/dt_i$. Согласно условию (4.3.1), она определяется мощностью накопления упругой энергии (сверх номинальной для конкретного типа льда и его температуры $\mathcal{E}_0$ – см. Рисунок 6.3.4,а) до критических уровней плотностей удельных энергий $\mathcal{E}_e$ и $\mathcal{E}_{cr}$, достаточных для разрушения соответствующего объема льда сдвигом (ai) или раздавливанием (bi) :

$$f_{ai} = \frac{1}{\Delta t_{ai}} = \frac{V_{ЛП}}{\varepsilon_e}; \quad f_{bi} = \frac{1}{\Delta t_{bi}} = \frac{V_{ЛП}}{\varepsilon_{cr}}. \quad (6.4.1)$$

Согласно нашим исследованиям (Рис. 6.6 и 6.8, б) значения интегральной удельной энергии разрушения $\mathcal{E}_{cr}$ в несколько раз превышает значение упругой энергии хрупкого разрушения $\mathcal{E}_e$, поэтому во столько же раз частота упругих «первичных» сколов льда будет в разы превышать частоту второй фазы взаимодействия – раздробления, смятия и экструзии обломков и крошки льда из зоны контакта. Следовательно, учитывая, что в каждом цикле ледовой нагрузки сооружению *передается некоторый объем энергии* ЛП, *затраты его энергии на разрушение льда* (и отклонения опоры МЛО) в полной мере могут быть охарактеризованы мощностью и частотой чередования фаз циклов хрупкого разрушения или раздавливания с экструзией льда.

Поэтому, полная запись получения среднего значения контактной силы¹⁵ ледового

¹⁵ Конструкция сооружения, как закрепленная нижним основанием консоль, отклоняется от вертикального положения под действием усредненного на отрезке времени значения горизонтальной силы

давления $\bar{F}_{\text{ср}}$, действующей на МЛС может быть только в виде частного от деления всей затраченной работы ΔA на длину прорезанного опорой МЛС ледового поля $\Delta L = L_j - L_i$ и, согласно порядку разрушения участков льда в принятой модели должна иметь такой вид:

$$\bar{F}_{\text{ср}} = \frac{A_L}{\Delta L} = \frac{\int_{L_i}^{L_j} (\varepsilon_{\text{ср}}^* \cdot D \cdot h_1 \cdot \delta_1 \cdot \rho + \varepsilon_{\text{ср}}^{**} \cdot D \cdot h_1 \cdot \delta_1^* \cdot \rho + \varepsilon_{\text{ср}}^{***} \cdot D \cdot h_1 \cdot \Delta_1 \cdot \rho) d\Delta}{\Delta L} \quad (N); \quad (6.4.2)$$

где $\varepsilon_{\text{ср}}^*$; $\varepsilon_{\text{ср}}^{**}$ и $\varepsilon_{\text{ср}}^{***}$ предельные значения удельных энергий разрушения единичного объема льда путем раздробления, сдвиговыми трещинами и смятия обломков льда в крошку и экструзии продуктов разрушения из зоны контакта. Безусловно, выполнить такой расчет (6.4.2) невозможно не только ввиду отсутствия численных значений величин «частного» вида $\varepsilon_{\text{ср}}^i$ удельных упругих энергий разрушения льда сдвигом, смятием и при экструзии, но и потому что невозможно в принципе определить геометрические параметры поверхностей и объемов разрушения в процессе внедрения опоры МЛС в ЛП.

Поэтому, формула (6.4.2) преобразуется в (6.4.3), где в качестве расчетного энергетического параметра прочности льда используется единое значение интегрального параметра - **эффективной плотности упругой удельной энергии разрушения единичного объема льда ε^*** , что в полной мере соответствует фундаментальному *принципу минимизации энергозатрат*. Это связано со свойством аддитивности энергии: согласно законам термодинамики, внутренняя энергия системы будет равна сумме внутренних объемных энергий отдельных не взаимодействующих ее частей. Это означает, что трещина зарождается в части материала, имеющем минимальную в «охваченной» области сопротивляемость разрыву связей и такой механизм разрушения, который потребует минимума энергозатрат. Природа реализует этот принцип во всем. Не исключение и эксперименты автора по определению критерия динамического разрушения льда по запатентованной методике, описанной в главе 4: испытаниями высоких призматических или трапециевидных образцов льда при их динамическом свободном одноосном сжатии с регистрацией временного цифрового ряда значений эффективной удельной энергии разрушения льда ε^* .

В этих опытах, равно как и в предложенной здесь модели разрушения льда, этот процесс включает все возможные механизмы его разрушения. а критерий всегда соответствует принципу минимума энергозатрат.

$$\bar{F}_{\text{ср}} = \frac{\Delta A}{\Delta L} = \frac{\varepsilon^* \cdot D \cdot h \cdot \Delta L \cdot \rho}{\Delta L} = \varepsilon^* \cdot D \cdot h \cdot \rho \quad (N); \quad (6.4.3)$$

Полученная формула по виду идентична формуле определения статической ледовой нагрузки по нормативной методике [104], но совершенно отлична по физическому смыслу. Наиболее простое отличие – она соответствует требованию размерности, потому что получена путем описания физического *процесса движения материи* (определение энергии).

Здесь, в этой работе, в формуле (6.4.3) среднее значение контактной силы $\bar{F}_{\text{ср}}$ есть **среднестатистическое значение** МЕРЫ качественного параметра процесса совершения этой силой работы, как на пути этого процесса, так и во времени этого процесса. Среднее значение контактной силы $\bar{F}_{\text{ср}}$ является математическим ожиданием максимальной вероятности значения контактной силы, как *непрерывной случайной величины* (Рисунок 6.4.2- б). и), а не эмпирическим путем. Второе отличие – кардинальное. Получаемая процессом динамического разрушения льда в образце при его динамическом разрушении эффективная удельная энергия разрушения $\mathcal{E}^*$; есть непрерывная случайная величина, характеризующая *процесс разрушения*, т.е. эта энергия – *результат работы силы* и разрушение – механизм преобразования энергии из упругой потенциальной в кинетическую энергию разрывов связей и снова в потенциальную поверхностную энергию осколков.

При статических испытаниях образцов льда на сжатие изыскатель получает **плотность распределения набора целых чисел**, как результат одного и того же типа испытаний по единой методике. Здесь среднестатистическое значение силы, приводящей к появлению первых трещин в образце – есть просто число, мера вероятности появлений разных чисел в некотором подмножестве числовой прямой. Это статистический количественный показатель из некоторой выборки чисел, но не мера качества результата испытаний.

Следовательно, среднее значение контактной силы $\bar{F}_{\text{ср}}$ можно получить, построив кривую нормального распределения вероятностей из обработки цифрового ряда зафиксированных в процессе испытаний текущих значений разрушающей образец значений силы. Этот способ стандартный и его основные элементы показаны на Рисунке 6.4.2-а и -г).

Второй вариант получения среднего значения контактной силы $\bar{F}_{\text{ср}}$ – делением полной энергии U_T , затраченной на разрушение образца на его участке длиной L , которая является площадью под кривой $F(L)$, (Рисунок 6.4.1 -б), на длину участка L .

На Рисунках 6.4.2-в,г приведен пример статистической обработки цифровой записи силы воздействия ледового поля на основание маяка Norströmsgrund в Финском заливе, опубликованной в работе [221]. На копии изображения, взятой из статьи, автор продемонстрировал описанный в этой диссертации метод, построив не приводившуюся в статье кривую нормального распределения значений контактных сил, записанных с использованием тензометрических панелей на реальном сооружении.

Данные этой публикации приведены далее в разделе по верификации предложенного здесь метода, поскольку они достоверно определены на натурном объекте и здесь удалось «досчитать некоторые значения, которые подтверждают не только адекватность нашего метода качественно, но и дают хорошее совпадение по численным значениям основных параметров.

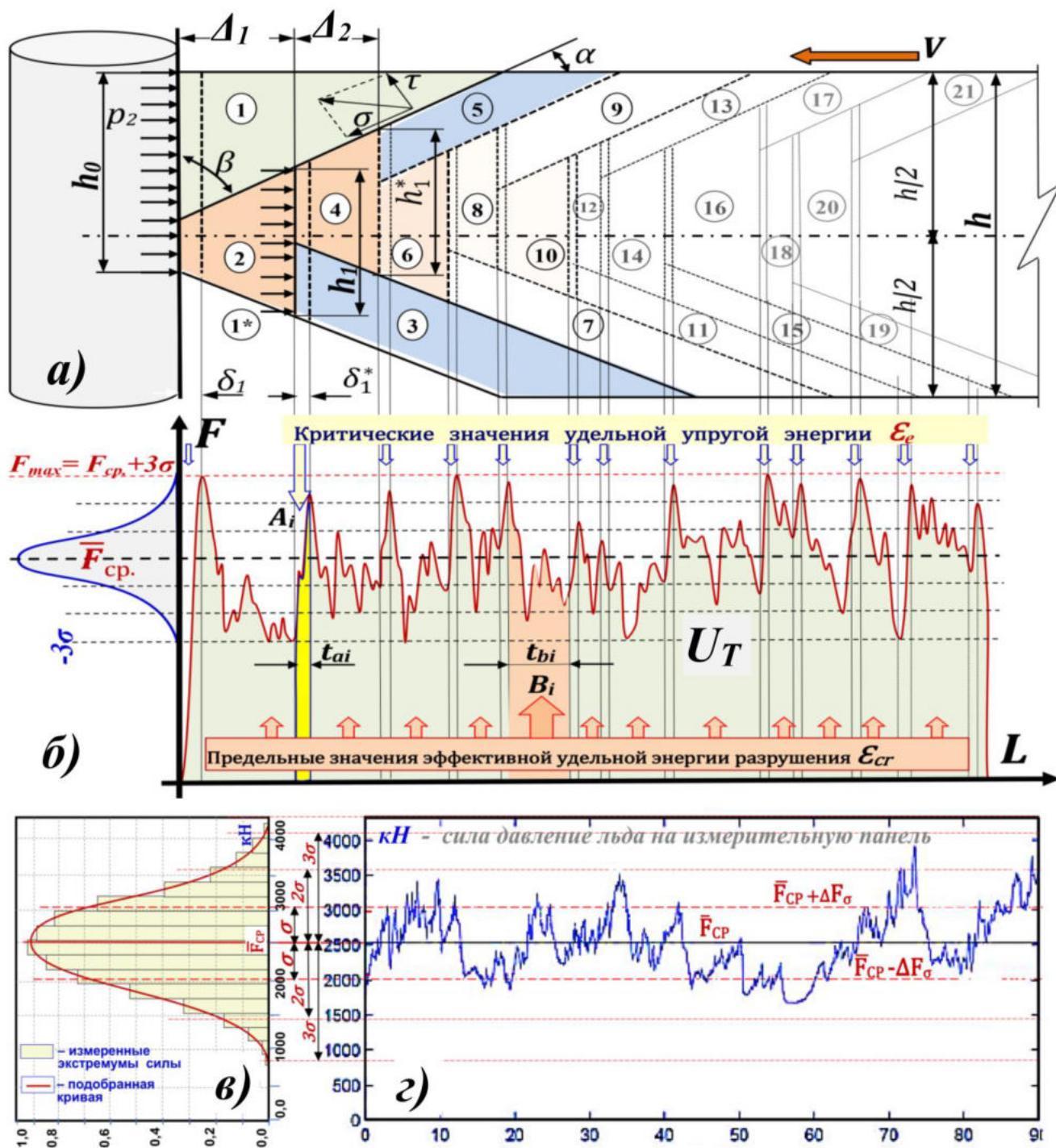


Рисунок 6.4.2 Метод расчета значений ледовой циклической нагрузки на МЛС по цифровой записи значений контактной силы в процессе динамического разрушения образца льда (а, б). Пример для маяка в Финском заливе по [221]

Учитывая приведенные утверждения и выкладки, максимальное расчетное значение контактной силы определяется по «Правилу 3-х сигм» - к математическому ожиданию – среднему значению контактной силы необходимо прибавить 3 значения средне-квадратического отклонения случайной величины, определенной по кривой нормального распределения (Рисунок 6.4.2):

$$F_{max} = \bar{F}_{cp} + 3\sigma. \quad (6.4.4)$$

Полученное таким образом значение максимальное расчетное значение контактной силы является первым параметром циклической ледовой нагрузки, значение которого надо применять в динамическом расчете МЛС.

Вторым расчетным параметром, который необходимо определить с гарантированной степенью надежности – *частота появления пиков ледовой нагрузки – что идентично циклам разрушения льда* при воздействии ЛП на опору МЛС. Качественная сторона проблемы, показанная в данной главе выше, дает основания описать процесс взаимодействия ЛП–МЛС количественно как процесс функционирования имитационной модели разрушения кромки ЛП по типу *несимметричных сдвигов блоков льда и смятия средней трапецевидной части* плиты согласно рисункам 6.4.1 и 6.4.2. Для решения этой задачи следует рассмотреть *суммарные затраты энергии на разрушение льда* в объеме образовавшейся прорези (канала), созданной в ЛП на фиксированной ее длине, где наблюдались несколько циклов разрушения льда. Учитывая постоянную скорость ЛП $V_{ЛП}$ (ввиду большого запаса кинетической энергии), затраченная на прорезание энергия запишется в виде:

$$U_T = \int_0^L F_t \cdot dL = \frac{V_{ЛП} \cdot \int_0^{T_L} F \cdot dt}{f_n}; \quad (6.4.4)$$

$$U_T = \frac{V_{ЛП} \cdot \bar{F}_{cp}}{f_n}; \quad f_L = \frac{V_{ЛП} \cdot \bar{F}_{cp}}{U_T} \quad (6.4.5)$$

где: f_L – частота (Гц), т.е. количество циклов разрушения льда на расчетной длине прорези (высоте разрушенной части образца), считается по количеству минимальных значений (нижних пиков) на исследуемом отрезке времени T_L .

Таким образом, частота циклов разрушения льда может также быть получена из результатов статистической обработки (Рисунок 6.4.2 -а) цифровой записи процесса разрушения блока или большого образца льда по методике автора – динамическим контролируемым сжатием с использованием формулы (6.4.5).

Характер затрат энергии ЛП на его взаимодействие с МЛЮ может быть описан графиком *спектральной плотности мощности*, приходящейся на единичный интервал частоты разрушения льда (Мвт/Гц; Мвт·с), а *суммарные затраты энергии* по всему спектру частот разрушения льда определяются площадью под графиком (Рисунок 6.4.2-б). Поэтому *для расчетов морских сооружений на циклическую ледовую нагрузку следует применять частоту разрушения льда*, определяемую по характеристике спектральной плотности мощности.

Таким образом, значение частоты разрушения льда f на контакте ЛП с опорой МЛС является вторым параметром, идентичным частоте циклической ледовой

нагрузки, значение которого надо применять в динамическом расчете МЛС.

Это есть *решение второй части поставленной цели исследования.*

6.5 Верификация расчетной энергетической динамической модели и расчетного метода определения параметров циклической ледовой нагрузки на морское ледостойкое основание с использованием энергетического критерия разрушения льда

Здесь представлены результаты эмпирической верификации принятой автором диссертации в виде двух гипотез энергетической концепции, реализованной доказательствами этих гипотез и являющейся *основой новой методологии расчета параметров циклической ледовой нагрузки* на МЛС. В совокупности принятые гипотезы, основанные на результатах теоретических и эмпирических исследований автора, опубликованных в его работах [119 – [127] и [363 – 371], предполагали:

а) существование интегрального энергетического критерия ($\mathcal{E}^*$), комплексно учитывающего уровень плотности упругой энергии деформирования сжимаемого локального объема льда в зоне контакта ЛП с вертикальной опорой МЛС и имеющего встроенный природный механизм триггера, запускающего механизм разрушения льда при нарушении энергетического баланса скорости притока энергии и мощности ее диссипации в напряженном объеме льда;

б) возможность экспериментального определения энергетического критерия ($\mathcal{E}^*$) испытаниями больших образцов натурального морского льда способом их динамического разрушения при сжатии с регистрацией параметров процесса в виде цифрового ряда, позволяющего определить значения разрушающей силы и периода цикла разрушения льда;

в) разработку имитационной модели разрушения льда на контакте кромки ЛП с вертикальной опорой МЛС, основанной на энергетической концепции описания комплексного процесса разрушения льда и с использованием интегрального энергетического критерия его разрушения $\mathcal{E}^*$.

Далее для верификации базовой концепции новой методологии используются экспериментальные данные, полученные автором (в т.ч. с соавторами) как для прямой, так и для косвенных верификаций. Используются общепринятые виды эмпирических данных, которые обычно применяются для подтверждения теорий, концепций и гипотез *путем установления факта*, констатирующего идентичность полученного в опыте признака явления, предлагаемому гипотезой признаку. Следуя принятой практике, *экспериментальный факт* должен быть зафиксированным в соответствующей области способом.

В данном случае в качестве эмпирических данных для верификации

доказательств принятых гипотез используются: частные примеры; фотографии, диаграммы, сводные табличные сравнительные данные, а также образцы, что позволяет обобщать выводы, подкреплять их в доказательство истинности гипотез.

В частности, в качестве *элементов верификации*, т.е. соответствия полученных результатов признакам их достоверности и новизны, являются полученные диссертантом *патенты на полезную модель – образец льда для испытания* с целью определения динамического критерия разрушения льда ε^* [82 – 84], а также *авторское свидетельство на способ испытания больших образцов льда*, выполняемого с той же целью [85].

6.5.1 Качественная верификация разрабатываемого метода получения удельной энергии механического разрушения льда для доказательства истинности принятой гипотезы

Прямая верификация гипотезы, как основы новой методологии – это *непосредственные наблюдения комплекса разных механизмов разрушения льда в каждом примере взаимодействия ледового поля с опорой (моделью) гидротехнического сооружения*.

Для прямой верификации гипотезы в части комплексности процесса разрушения льда на контакте с опорой сооружения следует обратиться к ПРИМЕРАМ на фотографиях автора и диаграммам, представленным в разделах 5.2 пятой главы (Рисунки 5.2.1 – 5.2.4) и разделах 6.2. и 6.3 данной главы (Рисунки 6.2.3 – 6.2.9) и к описаниям к ним. Приведенные на указанных рисунках фотографии результатов выполненных в рамках диссертационного исследования экспериментов содержат все **основные элементы комплексного механизма разрушения льда**: несимметричный сдвиг (скол) блоков льда от центра контакта в стороны свободных нижней и верхней поверхностей; развитие горизонтальных круговых трещин, расщепляющих плиту льда по толщине; развитие магистральных вертикальных радиальных трещин; разрушение продольных консольных балок льда, защемленных в массиве ледовой плиты дальними концами путем сколов рабочих граней; дробление льда в зоне контактной поверхности балок; смятие мелкодробленого льда в крошку; вытеснение крошки и обломков льда из зоны контакта и пр.

Следует обратить внимание на факт неравномерного скалывания верхней и нижней поверхностей плиты (Рисунок 5.2.1-а или 6.3.8). Это значит, что сначала всегда *будет скалываться только один из «клиньев скола»* у свободной поверхности, что и заложено в разработанную имитационную модель.

Эти иллюстрации примеров *есть ПРЯМАЯ верификация* выдвинутой в конце раздела 6.2 данной главы *гипотезы*, подтверждающая достаточно полно и убедительно гипотезу как в части *комплексности процесса разрушения, так и в его стохастической*

природе и разнообразии типов механизмов его разрушения в зависимости от физического состояния льда и скорости приложения нагрузки.

Косвенная верификация принятой гипотезы по установлению соответствия конкретных признаков, качества или измеряемых показателей в диссертации *выполнена эмпирическим путем*:

– *в части соответствия* исходным теоретическим основаниям ее принятия («классическим» энергетическим теориям прочности) – обоснованием **четырех основных следствий, вытекающих из гипотезы**, с учетом особенностей морского льда **методом численного моделирования**. Доказательства следствий приведены **в главе 4**;

– *в части соответствия качества* критерия ε_{cr} , получаемого опытным путем имеющему место быть в натурных условиях – полным соответствием главным положениям 3-х основополагающих теорем **подобия явлений и процессов**: теореме Ньютона, теореме Бэкингема и теореме Кирпичева-Гухмана: а) они происходят **в геометрически подобных системах**, б) они **подобны качественно** и в) они **количественно описываются подобными уравнениями состояния**. Соблюдение кинематического, динамического и материального подобия показано **в разделе 6.3.1 настоящей главы** диссертации при выборе способа экспериментального определения количественных значений основного параметра принятой гипотезы ε_{cr} путем испытаний больших образцов.

– в части подтверждения элемента *гипотезы о подобии* как «частных» **процессов разрушений** отдельного вида, так и **процесса разрушения льда в целом** в массиве льда в торцевой грани ЛП и при разрушении большого образца на испытательной машине с начальными и граничными условиями, идентичными реальным условиям общего процесса разрушения льда в торцевой части ЛП на его контакте с опорой МЛС можно считать доказанной результатами экспериментальных исследований, приведенных в разделе 6.3 данной главы диссертации.

Диаграмма разрушения образца – это и есть представление функционирования имитационной модели локального разрушения льда на торцевой грани ЛП на контакте с вертикальной опорой МЛС

6.5.2 Количественная верификация соответствие значений энергоемкости разрушения льда на образцах и в ледовом покрове

В этом разделе представлены сравнения количественных данных, характеризующих соответствие значений энергоемкости разрушения льда – **эффективной удельной энергии механического разрушения льда** – ε^* , получаемой испытаниями на динамическое сжатие больших образцов со значениями этого критерия, **в полунатурных экспериментах по прорезанию ледовых полей моделями опор сооружений** и расчетами по

опубликованным записям временных цифровых рядов ледовой нагрузки разных авто-
ров.

А. Сравнение расчетных максимальных значений контактной силы с использованием энергетического критерия $\mathcal{E}^*$, и частоты циклов разрушения льда в полунатурном эксперименте

Верификация разработанного в диссертации метода основана на известном *физическом подобии энергетических параметров процессов разрушения*, которые являются их фундаментальными характеристиками, в том числе и для натурного морского льда в природном ледовом покрове и в теле больших образцов из такого льда. Принцип энергетического подобия наиболее обобщенно проявляется в эмпирических *зависимостях амплитудно-пространственно-временных параметров процесса от энергии, выделяющейся при разрушении*, состоящем из иерархически выстроенных по масштабам процессов образования и накопления дефектов, что описывается диаграммами изменения контактной разрушающей силы во времени.

Первичная верификация метода произведена сравнением параметров гистограмм числовых рядов «Сила-время» процессов ледового воздействия на модели сооружения (обозначено как «*прорезание*»), протаскивавшихся в натурном льду Амурского залива [157] и разрушения больших образцов – блоков льда в лаборатории ДВФУ [128,132] (Рисунок 6.5.1; Таблица 6.5.1).

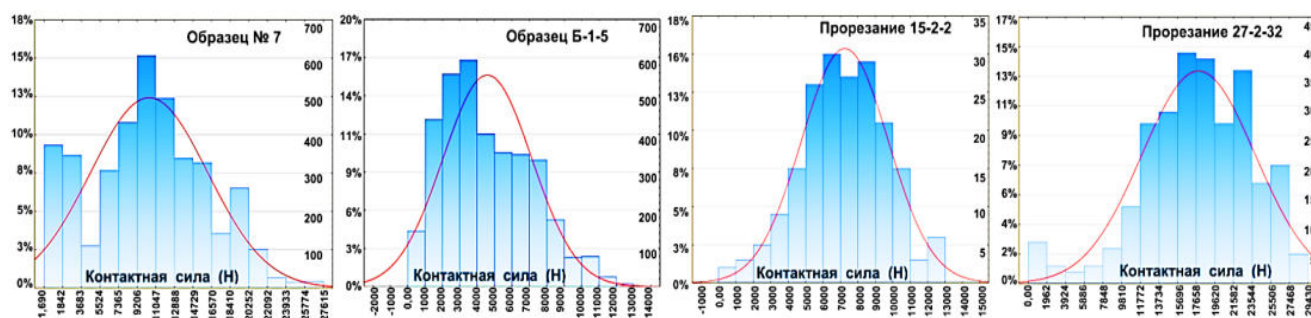


Рисунок 6.5.1 Сравнение параметров данных испытаний больших образцов
динамическим сжатием и опытов по прорезанию натурного морского льда
моделью опоры МЛО

Статистическая обработка числовых рядов для контактной разрушающей силы для сравниваемых способов разрушения льда (Рисунок 6.5.1) показала, что с вероятностью более 99% числовые ряды данных испытаний по обоим методам описываются законом нормального распределения (*Критерий Лиллиефорса $p < 0,01$*) и их гистограммы подобны по основным параметрам – *симметричности и унимодальности*. В результате

статистической обработки числовых рядов значений контактной разрушающей силы с **доверительной вероятностью 97%** показано (Таблица 6.5.1), что и для испытаний больших образцов динамическим сжатием и при прорезания натурного льда моделью опоры **расчетные значения $F_{расч-1}$** контактной разрушающей силы от измеренных значений **отличаются в пределах 5-15%** (строки 7-9 в Табл. 6.1). В то же время, **расчетные значения $F_{расч-2}$** полученные по формуле (6.4.3) с использованием значений эффективной удельной энергии разрушения льда ϵ_{cr}^* для определение **максимального значения контактных сил** по формулам (6.4.2) и (6.4.3) по сравнению с измеренным значением на натурном льду **отличаются в пределах 11-14%** (строки 10-12 в Табл. 6.1), что меньше погрешностей эксперимента.

Таблица 6.1 Экспериментальные данные для верификации метода

ПАРАМЕТРЫ	Образец № 7	Образец Б-1-5	Прорезание 15-2-2	Прорезание 27-2-32
1 Скорость движения льда – (мм/с)	2,5	5,0	12,8	18,8
2 Температура льда при испытании – °С	-3,5	-6,0	-3,0	-2,0
3 Эффект. Уд. энергия ϵ^* (Рис. 6.8) – (дж/г)	0,45	0,65	0,37	0,25
4 Количество точек исследуемого ряда – (N)	3902	3527	191	272
5 Среднее значение силы $F_{ср.}$ – (H)	10332	4553	7204	17821
6 Стандартное отклонение σ (StdDv) – (H)	5770	2540	2480	5933
7 Максимальная измеренная сила F_{max} – (H)	27615	12206	12949	29430
8 Расчетная сила $F_{расч.1} = F_{ср.} + 2,75 \sigma$ – (H)	27644	12173	14645	35621
9 Отклонение $F_{max} / F_{расч.1}$ – (%)	5,11	-5,47	-8,2	-16,0
10 Ср. расч. сила $F_{ср*}$ по ф.(6.4.3) с ϵ_{cr}^* – (H)	Расчеты F_{max} с эффективной удельной энергией разрушения ϵ^*		7675	17177
11 Расчетная сила $F_{расч.2} = F_{ср*} + 2,75 \sigma$ – (H)			14495	34136
12 Отклонение $F_{max} / F_{расч.2}$ – (%)			-11,8	-13,8

Вторым верифицируемым параметром предлагаемого метода является расчетная частота (цикличность) ледовой нагрузки f_{cicl} – количество циклов разрушения льда в секунду. В каждом цикле ледовой нагрузки, пропорционально его продолжительности и амплитуде силы в этом цикле сооружению передается некоторый объем энергии ЛП, **суммарные затраты энергии** по всему спектру частот разрушения льда определяются площадью под графиком «сила-перемещение» (Рис. 6.5; формула (6.1)). Но амплитудные спектры затраченной «в циклах» энергии во времени имеют характерные точки, отражающие качественно различные пространственно-временные этапы разрушения льда, которые свидетельствуют как о многоуровневости этого процесса, так и о различных мощностях затраченной на развитие разрушающих трещин энергии на каждом отрезке времени. Следовательно, **затраты энергии ЛП на разрушение льда** (и отклонения опоры МЛЮ) в полной мере могут быть охарактеризованы мощностью и частотой чередования фаз

циклов разрушения/экструзии льда. Характер затрат энергии ЛП на его взаимодействие с МЛО может быть описан спектральным распределением мощности, приходящейся на единичный интервал частоты разрушения льда (Мвт/Гц; Мвт·с).

На рисунке 6.5.2 приведены сравнения спектральных плотностей мощностей разрушения льда в больших образцах, раздавливаемых на прессе и опытах по прорезанию натурного морского льда в майнах.

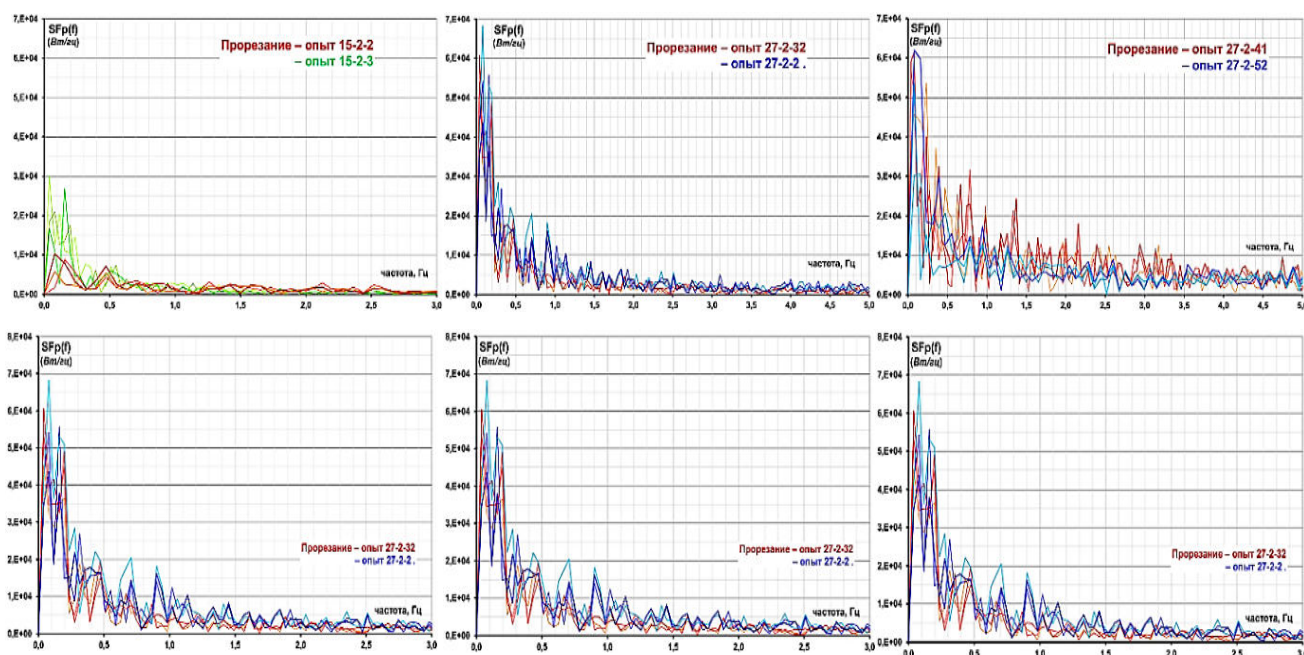


Рисунок 6.5.2 Сравнение диаграмм спектрального распределения мощности энергии, на единичном интервале частоты разрушения льда при прорезании ЛП моделью опоры [157] и при испытании больших образцов на динамическое сжатие [128,132]

Из анализа сравниваемых данных (Рис. 6.7–6.9) следует, что метод испытания больших образцов льда при постоянной скорости движения плиты пресса не только обеспечивает полную идентичность качественных параметров процесса испытаний образцов процессам разрушения кромки ЛП в полунатурных экспериментах, но и дает возможность получения количественных значений эффективной удельной энергии разрушения льда ϵ_{cr}^* , удовлетворительно согласующихся со значениями этой величины, полученными в натурных и полунатурных экспериментах.

В этом процессе важную роль играет скорость движения ЛП и соотношение жесткости льда и сооружения, определяемые с учетом соотношения толщины льда h и ширины сооружения D из равенства энергии одного цикла разрушения (слоя) льда и энергии единичного отклонения опоры сооружения от положения равновесия.

Б. Сравнение численных значений энергетического критерия ϵ^* ,

параметров контактной силы и частоты циклов разрушения льда
с данными, зафиксированными на реальных сооружениях

Здесь для верификации метода произведено сравнение взятых из опубликованных записей диаграмм силы ледового воздействия на реальные сооружения и на модели, протаскиваемые в натурном льду и в ледовых бассейнах – с диаграммами разрушения больших образцов – блоков льда в лаборатории ДВФУ – Таблица 6.5.1.

Таблица 6.5.1 Верификация расчетной модели и метода испытания образцов

Авторы, источник, год	Тип сооружения, образца	D опоры (м)	H льда лп (м)	$V_{лп}$ (м/с)	$T^{\circ}C$	Контактная сила (MN)		$\frac{F_{max}}{F_{cp.}}$	$f_{cr.ice}$ (гц)	ϵ^* (дж/г)
						F_{max}	$F_{cp.}$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Цуприк В.Г. 2016-18 г.г.	Цилиндр. Образцы d=125 mm H=400 mm сверху конус h= 5 см			0,005	-6,0	0,013	0,0045	2,8	0,3	0,65
				0,0025	-3,5	0,0276	0,0103	2,67	0,25	0,35
Fransson, Olofsson, POAC, 1991 [541]	Образцы – призмы 70x70x240 с пирамидой сверху h=5 см, натур- ный лед озера Лулео, Швеция			0,001	-10,0	0,009	0,0032	2,81	0,13	1,013
				0,010	-10,0	0,0055	0,025	2,2	0,17	0,595
				0,100	-10,0	0,0040	0,0021	2,1	0,14	1,226
A. Gürtner et al., 2010 [163]	Маяк, Балтика	7,2	0,69	0,13	-7,8	3,90	2,16	1,76	0,38	0,411
Kärnä, Qu, Yue et al. 2007. [598]	Швартовый пал Бохайский залив	1,5	0,3	0,2	-5,0	0,038	0,020	1,9	0,25	0,5
Kärnä, Yan, Report VTT, 2004 [806]	Маяк Norströmsgrund Балтика	7,2	0,35	0,13	-15,0	1,415	0,772	1,83	0,1	0,831
		7,2	0,35	0,15	-7,0	1,85	1,311	1,41	0,15	0,562
		7,2	0,25	0,18	-15,0	0,40	0,185	2,15	0,1	0,911
Беккер и др. ДВПИ, 1986 [533]	Прорез-е натурного льда моделями	0,16	0,14	0,0128	-3,0	0,0129	0,0072	1,79	0,1	0,37
		0,53	0,14	0,0188	-2,0	0,0294	0,0178	1,65	0,1	0,25

Результаты сравнения характера диаграмм процесса прорезания ледовых полей вертикальным опорами реально функционирующих морских гидротехнических сооружений показывают удовлетворительное совпадение несущих частот распределения мощности энергии разрушения льда позволяют считать предлагаемый методы определения ϵ^* , значений максимальных контактных сил ледового давления и частоты появления этих значений полностью адекватными реальными процессами, что дает возможность их применения в инженерных расчетах ледовой нагрузки для определения параметров ее цикличности.

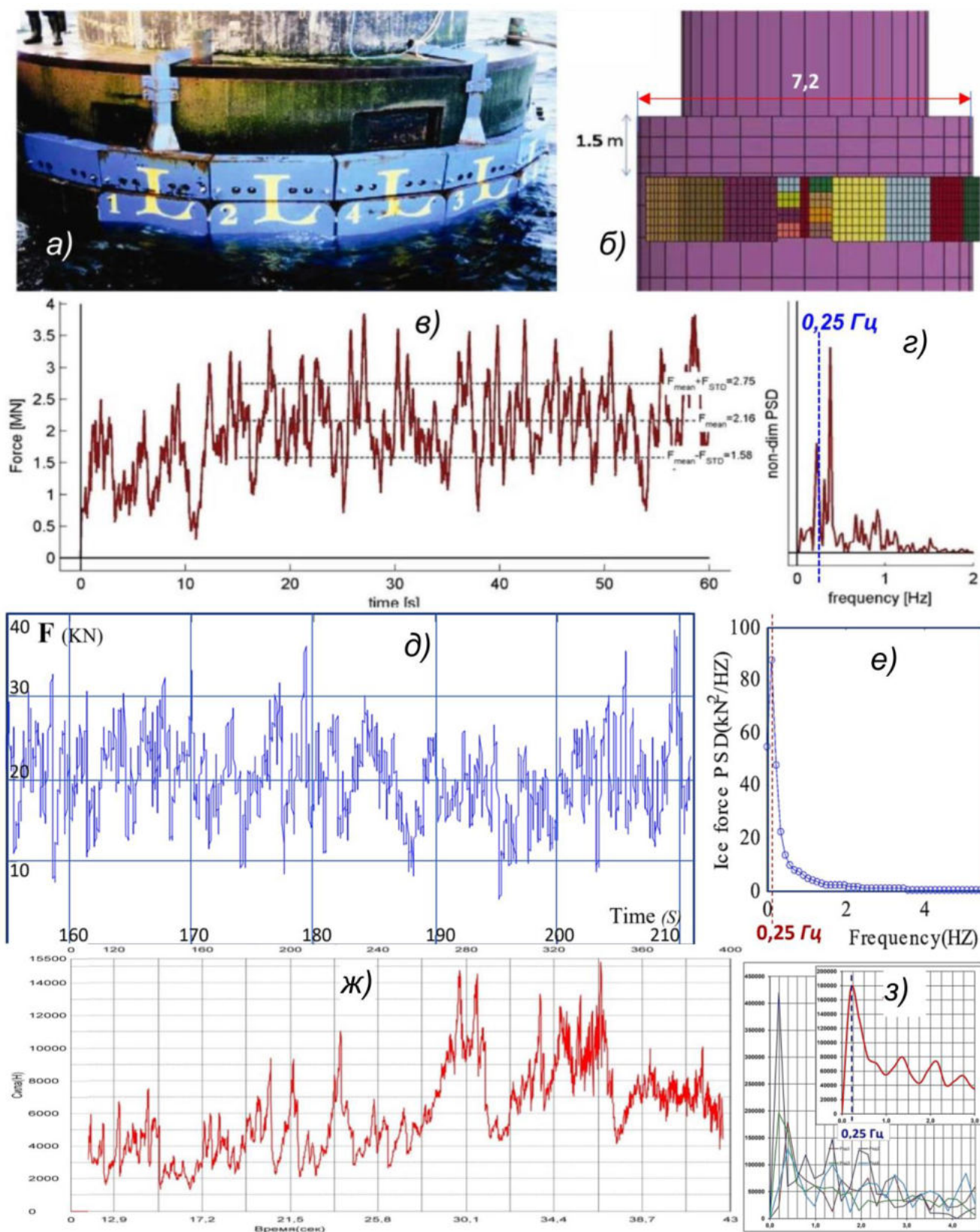


Рисунок 6.5.3 Характер разрушения льда и частот спектрального распределения мощности энергии разрушения льда по диаграммам цифровых записей процесса взаимодействия ледовых полей с опорами реальных сооружений по [221 и 242] с результатами экспериментов автора (ж,з – для образца 1-Б-20-2017)

В приложении приведены «Рекомендации по применению «Методологии определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на морские сооружения на основе энергетического подхода».

Цель, поставленную в диссертации по решению указанной проблемы, можно считать достигнутой, проблему – решенной.

Заключение по главе 6

В процессе изложенных в заключительной шестой главе диссертации исследований получены эмпирические доказательства приемлемости и реализуемости принятой энергетической концепции, как основы новой *методологии расчета параметров циклической ледовой нагрузки* на МЛС и разработаны и апробированы:

- способ испытаний больших образцов льда, как представительных объемов массива натурального льда, на динамическое сжатие с целью определения энергетического динамического критерия разрушения льда $\mathcal{E}^*$

- критерий механического контактного разрушения морского льда – эффективная удельная энергия разрушения $\mathcal{E}^*$, который комплексно учитывает все типы деформирования и разрушения льда на всех уровнях его структуры; характеризует реологическое поведение льда; адекватно описывает физическое состояние льда; регулирует частоту разрушения льда с учетом его температуры;

- имитационная модель локального разрушения льда на контакте кромки ЛП с вертикальной цилиндрической опорой МЛС, использующая в ее функционировании интегральный энергетический динамический критерий механического разрушения морского льда $\mathcal{E}^*$.

Результаты полунатурных и лабораторных экспериментов, в дополнение к целям, ставившимся для их проведения, дали два важных вывода, которые подтверждают соответствующие гипотезы. Первый заключается в том, что характер процесса накопления потенциальной упругой энергии в объеме льда при его упругой деформации остается идентичным для разных скоростей приложения нагрузки в диапазоне реальных скоростей взаимодействия между ЛП и МЛС.

В качестве второго вывода, в результате сравнительного исследования, следует отметить, что скорость взаимодействия льда с препятствием напрямую влияет на скорость достижения критических значений величины «плотности удельной упругой энергии», что и вызывает разрушение льда. Следовательно, период разрушения льда зависит от скорости ЛП прямо пропорционально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований в диссертации получены новые результаты и сделаны следующие выводы.

1. Проанализированы результаты опубликованных за полувековой период исследований по проблеме определения расчетных параметров воздействия циклических ледовых нагрузок на отдельно стоящие сооружения шельфовой зоны и документы по нормативному регулированию в этой сфере.

2. Показано, что задачи выполнения расчетов параметров циклических ледовых нагрузок, возникающих в процессе разрушения льда на поверхности опор сооружений с вертикальной гранью, в научно-методологическом плане не разработаны, но, в то же время, согласно требованиям нормативных документов по надежности проектируемых конструкций, такие параметры необходимы для выполнения динамического расчета сооружений.

3. Сформулирована цель работы – создание расчетно – экспериментальной методологии, основанной на объективных фундаментальных законах сохранения и обеспечивающей получение адекватных реальному процессу разрушения льда характеристик циклической ледовой нагрузки от дрейфующих ледовых полей на морское ледостойкое гидротехническое сооружение.

4. Разработана концепция новой методологии расчета динамических характеристик циклической ледовой нагрузки на МГТС, основанной на описании процесса периодического разрушения льда в зоне контакта грани ледового поля с поверхностью опоры сооружения.

5. Проведены исследования комплексного явления взаимодействия элементов системы «ЛП–МЛО», в котором развиваются процессы автоколебаний с критическими отклонениями сооружения, возникновение которых описывается параметрами механизма периодического контактного разрушения локального объема льда, обусловленного достижением предельной плотности упругой энергии его деформирования.

6. Показана суть явления цикличности ледовых нагрузок на сооружение как периодическое прерывание монотонного процесса накопления упругих деформаций в ледовом покрове и сооружении в момент разрушения локального объема льда в зоне их контакта на кромке ледового поля – как комплекса неодновременных и стохастических процессов развития системы трещин отрыва и сдвиговой природы, дробления и смятия обломков льда и спонтанного освобождения потенциальной энергии, аккумулированной в напряженном массиве ледового поля.

7. Обосновано и показано применение энергетической концепции для описания циклической нагрузки от льда на шельфовые сооружения при динамическом разрушении локального объема льда, где достигается нарушение равенства скорости притока энергии

и мощности ее рассеяния, что позволяет путем оперирования энергией как внутренним состоянием материала, использовать описания процесса хорошо математизированные методы механики, физики, термодинамики, теории упругости и др. фундаментальных наук.

7. Выявлен и описан основной параметр, определяющий периодичность разрушения льда – пороговое значение плотности энергии упругого сжатия локального объема льда, необходимое для «запуска» механизма разрушения льда в массиве торцевой грани ледового поля.

8. Показана объективная целесообразность использования параметра *плотности удельной энергии механического разрушения льда ϵ_{cr}* в расчетах характеристик цикличности динамической ледовой нагрузки **в качестве интегративного критерия** контактного динамического разрушения льда, основанного на комплексном учете энергозатрат всего комплекса разрушений в локальном объеме льда в зоне контакта ледового поля с морским сооружением **в виде эффективной удельной энергии механического разрушения льда ϵ^*** .

9. Показано, что, с учетом возможности льда деформироваться по вязкому, вязко-упругому и хрупкому механизмам, дозирующим, согласно теории колебаний, «подкачку» энергии в колебательный контур системы (в МЛС) в соответствии с физико-механическими характеристикам льда, энергетический критерий разрушения льда ϵ^* является регулятором периода и амплитуды колебаний МЛЮ, ограничивающим рост ее значений при автоколебаниях.

10. Разработан метод определения расчетных значений динамической прочности морского льда для динамических расчетов МГТС - **эффективной удельной энергии механического разрушения льда ϵ^*** испытаниями больших призматических образцов на свободное динамическое сжатие в условиях постоянной скорости перемещения траверсы испытательной машины и регистрации цифровых рядов для силы и перемещения.

11. Представлены результаты анализа метода экспериментального определения энергетического критерия разрушения льда на предмет его соответствия требованиям универсальности к критериям такого рода: математическому описанию, полноте, непротиворечивости, предсказуемости, простоте определения, инвариантности к условиям проведения испытаний, воспроизводимости и стабильности получаемых значений.

12. Предложена имитационная модель расчета динамической ледовой нагрузки с целью демонстрации функциональности применения критерия динамической прочности льда – эффективной удельной энергии механического разрушения льда ϵ^* и адекватности полученных результатов реально наблюдаемым в реальных примерах процессам.

13. Разработана методика расчета параметров цикличности ледовой нагрузки на морские сооружения, основанной на применении эффективной удельной энергии механического разрушения льда ϵ^* .

14. Выполнены процедуры верификации методики расчета параметров цикличности ледовой нагрузки на морские сооружения, основанной на применении эффективной удельной энергии механического разрушения льда ε^* .

Цель работы достигнута: создана новая прогрессивная *расчетно – экспериментальная методология*, основанная на объективных фундаментальных законах сохранения и обеспечивающая получение адекватных реальному процессу разрушения льда характеристик циклической ледовой нагрузки от дрейфующих ледовых полей на морское ледостойкое гидротехническое сооружение; разработан необходимый комплекс составляющих этой методологии методов, моделей, методик и способов.

Приведены примеры практического приложения использования нового критерия прочности льда для расчетов параметров цикличности ледовой нагрузки на шельфовые гидротехнические сооружения, показавшие полную адекватность предложенной методологии реальным практическим задачам определения параметров цикличности динамической нагрузки для их применения в расчете МГТС.

Полученные результаты рекомендуются к учету при подготовке новых нормативных документов. Определенная небольшая детальная проработка предложенной методологии с отработкой статистики и рекомендательное закрепление «стандартизированных» положений методики проведения опытов для получения нового критерия дадут возможность быстрого формирования и утверждения новой главы в СП 38 13330.2018 для закрепления формы и состава рекомендаций для нормативного расчета показателей цикличности для их применения в выполнении динамического расчета морского ледостойкого сооружения, обеспечивающего его расчетный уровень надежности.

1. **Ажермачев, Г. А.** Особенности проектирования железобетонных морских платформ для условий Арктики / Г. А. Ажермачев. Технология судостроения. 1990. № 9. С. 26-27.
2. **Алексеев, Ю. Н.** Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа / Ю. Н. Алексеев, В. П. Афанасьев, О. Е. Литонов [и др.] / под ред. О. Е. Литонова, В. В. Панова. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2001. - 360 с.
3. **Алиферова, Е.** Газпром геологоразведка завершила сейсморазведочные работы на Нярмейском и Ленинградском участках недр в Карском море / Е. Алиферова. - URL : <https://neftegaz.ru/news/Geological-ploration/198138-gazprom-geologorazvedka-zavershila-seysmorazvedochnye-raboty-na-nyarmeyskom-i-leningradskom-uchastka/jr/> (Дата обращения 02.01.2020). - Режим доступа : neftegaz.ru.
4. **Андронов, А. А.** Теория колебаний / А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. - 2-е изд. - Москва : Наука, 1981. - 918 с.
5. **Анисимов, О. С.** Методология: функция, сущность, становление (динамика и связь времён) / Анисимов О. С. – Москва : ЛМА, 1995. - 380 с.
6. **Апполонов, Е. М.** Совершенствование методологии определения ледовых нагрузок / Е. М. Апполонов, А. В. Дидковский, А. А. Кутейников [и др.]. - Москва : Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. 2002. Вып. 25. – С. 83-100.
7. **Апполонов, Е. М.** Новая модель динамического разрушения льда как основа для совершенствования требований правил регистра к ледовым усилениям судов и ледоколов / Е. М. Апполонов, В. В. Платонов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. № 4(390). – С. 99–116.
8. **Аугусти, А.** Вероятностные методы в строительном проектировании / А. Аугусти, А. Барата, Ф. Кашиати / Пер. с англ. Ю.Д. Сухова. – Москва : Стройиздат, 1988. – 584 с.
9. **Афанасьев, В. П.** Давление льда на морские отдельно стоящие опоры / В. П. Афанасьев, Ю. В. Долгополов, З. К. Швайштейн // Труды ААНИИ. № 300. 1971, с. 101-104.
10. **Цуприк, В.Г.** Исследования удельной энергии разрушения льда методом испытания образцов на одноосное сжатие / Баенхаев А. К., Беккер А. Т., Иволгин Е. С. [и др.]. Полярная механика : материалы междунар. науч. конференции. - Владивосток, 2015. - С. 332-345.
11. **Веккер, А.Т.** The stochastic model of ice force on offshore structures in time domain/A.T. Веккер, A.N. Perepelitsa // Proc. ISOPE Conf., v.2, Seoul, 1990, p.335-340.
12. **Беккер, А. Т.** Оценка надёжности ледостойких сооружений континентального шельфа / А. Т. Беккер, О. А. Комарова // Тр. междунар. конф. «Стихия. Строительство. Безопасность». Владивосток, 1997. - С. 242.
13. **Беллендир, Е. Н.** Вероятностные методы оценки надёжности грунтовых гидротехнических сооружений / Е. Н. Беллендир, Д. А. Ивашинцов [и др.]. - Санкт-Петербург : Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2003. - 553 с.
14. **Беллендир, Е. Н.** Научное обоснование проектирования гравитационных опорных блоков морских ледостойких платформ и их сопряжения с грунтовым основанием. Автореф. дис... д-ра техн. наук. ВНИИГ. Санкт-Петербург, 2005. - 45 с.
15. **Берникер, Я. С.** Состояние основных конструктивных решений морских стационарных платформ, работающих в условиях ледовых воздействий / Я. С. Берникер, Н. Н. Рыжаков. - Москва : ВНИИЭгазпром, 1985. - С. 74.
16. **Болотин, В. В.** Методы теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений / В. В. Болотин. 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Стройиздат, 1982. - 351 с.

17. **Вершинин, С. А.** Давление льда на отдельно стоящие опоры по лабораторным и натурным испытаниям / С.А. Вершинин, Е. М. Копайгородский, В. В. Панов, З. И. Швайнштейн // Труды ААНИИ. Москва, 1975. Т. 326. С. 59-65.

18. **Вершинин, С. А.** Феноменологические модели разрушения образцов морского льда при сжатии / С. А. Вершинин // Ледотермические явления и их учет при возведении и эксплуатации гидроузлов и гидротехнических сооружений. – Ленинград : Изд-во ВНИИГ, 1979. – С. 109-114.

19. **Вершинин, С. А.** Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа // С. А. Вершинин, П. А. Трусков, К. В. Кузьмичев. – Москва : Институт Гипростроймост. 2005. – 208 с.

20. **Вершинин, С. А.** Взаимодействие морских ледяных полей с опорами сооружений континентального шельфа / С. А. Вершинин. В кн: Механика и физика льда. – Москва, 1983. С. 38-55.

21. **Вершинин, С. А.** Взаимодействие гибких конструкций морских опор с дрейфующими ледяными полями / С. А. Вершинин, А. А. Илиади // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике: Ледотермические проблемы в северном гидротехническом строительстве и вопросы продления навигации (Архангельск). – Ленинград : Гидрометеиздат, 1988. – С. 128-130.

22. **Вершинин, С. А.** Воздействие льда на морские сооружения шельфа / С. А. Вершинин // Итоги науки и техн., сер: Водный трансп. Т. 13. Москва : ВИНТИ, 1988. – 221 с.

23. **Вершинин, С. А.** Трение и истирающее воздействие льда на сооружения континентального шельфа / С. А. Вершинин, П. А. Трусков. – Москва ; Атлет-пресс, 2010. – 196 с.

24. **Войтковский, К. Ф.** Механические свойства льда / К.Ф. Войтковский. – Москва : Изд-во ПН СССР, 1960. – 100 с.

25. **ВСН I-71/М0.** Временная инструкция по определению ледовых нагрузок на морские гидротехнические сооружения. – Москва : Изд-во Министерства обороны СССР, 1971. – 12 с.

26. **ВСН 41.88.** Проектирование ледостойких стационарных платформ. Ведомственные строительные нормы (экспериментальные). /Миннефтепром. – М., 1988, 136 с.

27. **Голубев, В. Н.** Структурное ледоведение / Голубев В. Н. – Москва : Изд-во МГУ, 2000. – 88 с.

28. **Гольдштейн, Р. В.** О модели разрушения льда при большой площади контакта / Р.В. Гольдштейн, Н. Б. Осипенко // Механика твердого тела. 2011. № 1. – С. 137-153.

29. **Гольдштейн, Р. В.** Механика разрушения и некоторые вопросы разрушения льда / Р.В. Гольдштейн, Н. Б. Осипенко // В кн.: Механика и физика льда. – Москва : 1983. С. 65-94.

30. **Гомольский, С. Г.** Исследования ударов твердого тела о лед / С.Г. Гомольский, Н. Г. Храпатый, В. Г. Цуприк // В кн.: Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Ледотермические явления и их учёт при возведении и эксплуатации гидроузлов и гидротехнических сооружений. – Ленинград : Энергия, 1979. – С. 73-75.

31. **Горгуца, Р. Ю.** Влияние солёности и строения льда на его прочность / Р. Ю. Горгуца, Д. А. Ксенофонтова, А. В. Соколов // Прикладная механика. Владивосток, 2016.

32. **ГОСТ Р 27.301-2011.** Надежность в технике (ССНТ). Управление надежностью. Техника анализа безотказности. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 16 с.

33. **ГОСТ 27.003-2015.** Надежность в технике (ССНТ). Состав и общие правила задания требований по надежности. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 19 с.

34. **ГОСТ 27.002-2015.** Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения. Москва : Стандартинформ, 2015. 28 с.
35. **ГОСТ 27751-2014.** Межгосударственный стандарт. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. - Москва : Стандартинформ, 2015. - 14 с.
36. **ГОСТ 27.301-95.** Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. - Москва : Стандартинформ, 2017. - 16 с.
37. **ГОСТ 27751-2014.** Межгосударственный стандарт. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. - Москва : Стандартинформ, 2015. - 14 с.
38. **ГОСТ 3440-45.** Нагрузки на гидротехнические сооружения. Нагрузки ледовые. - Москва : Госстрой СССР, 1945. - 4 с.
39. **Григоренко, Ю. Н.** Комплексное освоение ресурсов и запасов углеводородов Дальнего Востока / Ю. Н. Григоренко, Л. С. Маргулис // Топливо-энергетический комплекс России: региональные аспекты. – Санкт-Петербург, 2004.
40. **Долгополов Ю.В.** Два расчетных случая для определения нагрузки на цилиндрические опоры при подвижке / Ю. В. Долгополов // Труды коорд. совещ. по гидротехнике. Регулир. ледовых явлений на каскадах гидроузлов. Вып. 111. ЛЕНИНГРАД Энергия, 1975. С.162-165.
41. **Доронин, Ю.П.** / Ю. П. Доронин, Д. Е. Хейсин // Морской лёд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1975. - 318 с.
42. **Епифанов, В. П.** Механика деформируемого льда / В. П. Епифанов // Итоги науки и техники. Сер. Гляциология. Т. 8. - Москва : ВИНТИ, 1991. 200 с.
43. **Ерасов, В. С.** Силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения / В. С. Ерасов, Е. И. Орешко // Труды ВИАМ : электрон. науч. журнал. 2017. № 10.
44. **Журков, С. Н.** К вопросу о физической основе прочности / С. Н. Журков // ФТТ. Т. 22, № 11. 1980. С. 3344-3349.
45. **Зарецкий, Ю. К.** Вязкопластичность льда и мерзлых грунтов / Ю. К. Зарецкий, Б. Д. Чумичев, А. Г. Щеболев. – Новосибирск : Наука, СО РАН, 1985. - 185 с.
46. **Зубов, Н. Н.** Льды Арктики / Н. Н. Зубов. - Москва : Географгиз, 1963. - 360 с.
47. **Ильина, С. В.** Проблемы при выборе типа морской стационарной платформы для работы в ледовых условиях / С. В. Ильина // Технические науки в России и за рубежом: материалы междунар. заоч. науч. конф. «Молодой ученый». - Москва : Ваш полиграфический партнер, 2011. - С. 86-91.
48. **Исследования пространственно-временной изменчивости структуры и физико-механических свойств морского ледяного покрова на базе анализа экспериментальных и архивных данных по наблюдениям за состоянием природной среды : Отчет о НИР. ФЦП «Мировой океан». Проект 5.17. ААНИИ, 2002. - 116 с.**
49. **Ионов, В. Н.** Напряжения в телах при импульсивном нагружении / В. Н. Ионов, П. М. Огибалов. - Москва : Высшая школа, 1975. - 463 с.
50. **Карташев В.А.** Система систем. Очерки общей теории и методологии. – М.: «Прогресс-Академия», 1995. С. 325.
51. **Картамышев, П. И.** Перспективные направления проектирования и строительства морских стационарных платформ / П. И. Картамышев, Л. Б. Благовидов, Е. П. Морозов, Н. Я. Перец // Технология судостроения. № 9. 1990. С. 24-25.
52. **Карулин, Е. Б.** Математическое и физическое моделирование взаимодействия четырёхопорной конструкции с ровным льдом / Е. Б. Карулин, А. М. Карулина, К. Н. Шхинек, Г. А. Н. Томас // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. 2011. № 63. 0 С. 81-92.
53. **Ковалев, С. М.** Крупномасштабные испытания прочности дрейфующих и припайных льдов арктического шельфа / С. М. Ковалев, В. Н. Смирнов, А. И. Шушлебин [и

др.] / Труды международной конференции «Российский арктический шельф». Санкт-Петербург, 2015. - 18 с.

54. **Кольский, Г. А.** Волны напряжений и разрушение / Г. Кольский, Д. В. Рейдер // В кн.: Разрушение. Т. 1. Москва : Мир, 1973. С. 570-609.

55. Комаровский А.Н. Действие ледяного покрова на сооружения и борьба с ним. Ч. I и Ч. II. М.-Л.; Госэнергоиздат, 1932-1933, 175с., 189с.

56. **Комаровский, А. Н.** Действие ледяного покрова на сооружения и борьба с ним / А. Н. Комаровский. Ч. 1. – Москва – Ленинград : Госэнергоиздат, 1932. – 175 с.

57. **Копайгородский, Е. М.,** Вершинин, С.А. Исследования ледовых воздействий на цилиндрические опоры при подвижке ледяного поля / Е. М. Копайгородский, С. А. Вершинин // Гидротехническое строительство. 1973. № 9. - С. 40-42.

58. **Кореньков, В. А.** Натурные измерения динамического давления льда на бычок низконапорной плотины / В. А. Кореньков // Тр. коорд. совещаний по гидротехнике. Вып. 111. – Ленинград : Энергия, 1975. - С. 148–152.

59. **Кореньков, В. А.** Опыт натурных измерений ледовой динамической нагрузки на сооружения / В. А. Кореньков // Труды коорд. совещаний по гидротехнике. – Ленинград : Энергия, 1973. С. 117-124.

60. Коржавин, К.Н. Работы ледорезов мостовых опор в условиях ледохода сибирских рек. // Труды НИИВТа, вып. III. Томск, 1938.

61. **Коржавин, К. Н.** Влияние скорости нагружения на оценку прочности льда в расчетах ледовых нагрузок / К. Н. Коржавин, Ф. И. Птухин / Труды НИИЖТ. Вып. 60. - Новосибирск: Изд-во НИИЖТ, 1967. - С. 21-32.

62. **Коржавин, К. Н.** Обеспечение надежности сооружений при ледовых динамических нагрузках / К. Н. Коржавин, Ю. В. Долгополов, А.В. Кореньков / Москва : Информэнерго, 1978. – 64 с.

63. **Коржавин К.Н.** Воздействие льда на инженерные сооружения/ К. Н. Коржавин // Новосибирск : Изд-во СО АН СССР, 1962. - 224 с.

64. **Крупина, Н. А.** Комплексные исследования процессов нарастания и механики разрушения льда естественного намерзания в большом ледовом бассейне ААНИИ / Н.А. Крупина, Б. В. Иванов, И. В. Кубышкин [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 2(79). - С. 7-20.

65. **Кузнецов, П. А.** Проблемы обустройства морских месторождений российской Арктики / П. А. Кузнецов, П. В. Беляев, П. А. Тарасов // Научно-техн. вестник ОАО «НК «Роснефть». 2011. № 3. - С. 18-24.

66. **Кузнецов, П. А.** Действие льда на сооружения морских портов и защита от него / П. А. Кузнецов. – Ленинград : ИО КБФ, 1939. – 156 с.

67. **Курдюмов В. А., Хейсин Д.Е.** Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед. /В.А. Курдюмов, Д.Е. Хейсин. Прикладная механика, 1976, ч. XII, вып. 10, С. 103-109.

68. **Литонов, О. Е.** К вопросу анализа динамических моделей воздействия льда на морские платформы / О. Е. Литонов // Научно-техн. сборник РС. Вып. 34. - Санкт-Петербург : Российский морской регистр судоходства, 2011. - С. 237-241.

69. **Лавров, В. В.** Деформация и прочность льда / В. В. Лавров. - Ленинград : Гидрометеиздат, 1969. - 206 с.

70. **Любимов В.С.** Моделирование взаимодействия льда с цилиндрической опорой. – В сб. : Гидротехнические сооружения. Владивосток: ДВГУ, 1984. С.143-148.

71. **Мансуров, М. Н.** Критические ледовые воздействия на морские нефтегазопромысловые сооружения / М. Н. Мансуров, В. К. Востров // Вести газовой науки : научно-техн. Сборник. 2017. № 1(29). - С. 119-128.

72. **Методические указания** по определению ледовых нагрузок на опоры мостов / АО Корпорация "Трансстрой". АО НИИ транспортного строительства (ЦНИИС). Москва, 1993. - 24 с.

73. **Мешков, Ю. Я.** Концепция критической плотности энергии в моделях разрушения твердых тел / Ю. Я. Мешков // Успехи физики металлов (Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины). Т. 2. Киев, 2001. С. 7–50.

74. **Минин, В.** Экспертная платформа для Арктики, 2014 / В. Минин. - [Электронный ресурс]. – URL : <http://expert.ru/northwest/2014/48/ekspertnaya-platforma-dlya-arktiki/> (Дата обращения 11.03.2022).

75. **Миронов, Е. У.** Основные результаты пятилетних ледовых исследований для обеспечения проектирования объектов обустройства нефтегазовых месторождений в северо-западной части Каспийского моря / Е. У. Миронов, В. Н. Смирнов, В. А. Никитин, В. С. Порубаев // Труды международной конференции «Российский арктический шельф». 13–15 сентября, Санкт-Петербург, 2005. - С. 293–298.

76. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНИП 2.05.04-82*/ Госстрой СССР. М.: Стройиздат, 1995, 46с.

77. **Назинцев, Ю. Л.** Фазовый состав и теплофизические характеристики морского льда / Ю. Л. Назинцев, В. В. Панов. - Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2000. – 84 с.

78. **Никифоровский, В. С.** Динамическое разрушение твердых тел / В. С. Никифоровский, Е. И. Шемякин. - Новосибирск : Наука, 1976. - 271 с.

79. **Нилл, К. Р.** Динамическое воздействие льдин на устои моста / К. Р. Нилл // Лёд и его воздействие на гидротехнические сооружения : материалы симпозиума МАГИ. – Ленинград, 1972. - С. 48-55.

80. **Новиков, А. М.** Методология / А. М. Новиков, Д. А. Новиков. – Москва : Синтег, 2007. - 668 с.

81. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследования пространственно-временной изменчивости структуры и физико-механических свойств морского ледяного покрова на базе анализа экспериментальных и архивных данных по наблюдениям за состоянием природной среды (заключительный). ФЦП «Мировой океан». Проект 5.17. ААНИИ, 2002. 116 с.

82. **Патент № 170013** РФ, МПК G01N 3/08(2006/01). Образец для определения удельной энергии разрушения материала при испытаниях на осевое сжатие : 2016144090 : заяв. 10.11.2016 : опубл. 2017.04.01 / В. Г. Цуприк, заявитель ДВФУ. – 4 с.

83. **Патент № 170014** РФ, МПК G01N 3/08(2006/01), Образец для определения удельной энергии разрушения материала при испытаниях на осевое сжатие : 2016144090 : заяв. 10.11.2016 : опубл. 2017.04.01 / Цуприк В.Г., заявитель ДВФУ. – 4 с.

84. **Патент № 170057** РФ, МПК G01N 3/08(2006/01), Образец для определения удельной энергии разрушения материала при испытаниях на осевое сжатие : 2016144090 : заяв. 10.11.2016 : опубл. 2017.04.01 / Цуприк В.Г., заявитель ДВФУ. – 4 с.

85. **Патент № 2640452** РФ, МПК G01N 3/08(2006/01), Способ определения удельной энергии механического разрушения льда : 2016144090 : заяв. 10.11.2016 : опубл. 2017.04.01 / Цуприк В.Г., заявитель ДВФУ. – 5 с.

86. **Перегудов, Ф. И.** Введение в системный анализ / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – Москва : Высшая школа, 1989.

87. **Платформа «Приразломная».** – URL : www.shelf.gazprom-neft.ru (Дата обращения 11.03.2022).

88. Платформа «Моликпак» (ПА-А). Интернет ресурс. Доступ: <http://www.sakhalinenergy.ru/ru/company/assets/molikpak/>. Дата обращения 30.11.2019.

89. **Политько В.А., Кантаржи И.Г.** Воздействия ровного ледового поля на многоопорные гидротехнические сооружения / В.А. Политько, И.Г. Кантаржи // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 6(74). С. 43–52.

90. **Правила классификации, и постройки морских судов.** Т. 1. 17-е изд. – Санкт-Петербург : Российский Морской Регистр Судоходства, 2014. – 535 с.
91. **Проект «Сахалин».** Источник: Neftegaz.RU: <https://www.gazprom-neft.ru/company/major-projects/sakhalin/> Дата обращения 02.01.2020.
92. **Р 31.2.07-01.** Указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения. - Москва : Минтрансстрой РФ, 2001. - 47 с.
93. **Разработка рекомендаций и РКД по конструированию и нормированию прочности ледового пояса перспективных инженерных сооружений, работающих на арктическом шельфе, типовых конструкций ледовой защиты райзеров плавучих буровых установок, обеспечивающей их высокую надежность и малую материалоёмкость :** Отчет об ОКР. ДВФУ, 2014. Инв. № 31/3.Д-386-2014.2.
94. **Ржаницын, А. Р.** Теория расчёта строительных конструкций на надёжность / А. Р. Ржаницын. – Москва : Стройиздат, 1978. – 239 с.
95. **Ромбах, В. П.** Введение в физику разрушения. Ч. 1. Эдмондс, США. - С. 320. – URL: www.docplayer.ru/28100302-V-p-rombah-vvedenie-v-fiziku-razrusheniya.html#show_full_text (Дата обращения 11.03.2022).
96. **Руководство по изучению физико-механических свойств льда** / Под ред. Г. Н. Яковлева. – Ленинград : Изд-во ААНИИ, 1971. - 45 с.
97. **Сазонов, К. Е.** Ледовые бассейны / К. Е. Сазонов, В. О. Боруевич, А. А. Русецкий, И. А. Соловьев. Современные гидродинамические лаборатории. - Санкт-Петербург, 2008. - С. 178-208.
98. **Сазонов, К. Е.** Развитие морской ледотехники в России: история и современность / К. Е. Сазонов // Арктика : экология и экономика. 2013. № 2(10). - С. 92-103.
99. **Санников, А. В.** Численное моделирование экспериментов по исследованию прочностных характеристик льда / А. В. Санников, В. А. Миряха, И. Б. Петров // Полярная механика: материалы 3-й междунар. науч. конф. –Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2015. - С. 141–151.
100. **Си, Г.** Математическая теория хрупкого разрушения // Разрушение, Т.2. Математические основы теории разрушения / Г. Си, Г. Либовиц. - Москва : Мир, 1975. – С. 83–203.
101. **Смирнов, В. Н.** Методическое пособие по изучению физико-механических характеристик ледяных образований как исходных данных для расчета ледовых нагрузок на берега, дно и морские сооружения / В. Н. Смирнов, А. И. Шушлебин, С. М. Ковалев, И. Б. Шейкин. - Санкт-Петербург : ААНИИ, 2011. - 180 с.
102. **Соломатин, В. И.** Структурные механизмы деформации льда / В. И. Соломатин // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477, № 4. С. 475–479.
103. **СП 11-114-2004** Инженерные изыскания на шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. - Москва : ПНИИИС по инженерным изысканиям в строительстве, 2004. - 88 с.
104. **СП 38.13330.2012.** Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Свод правил, актуализированная редакция СНиП 2.05.04-82*.
105. **Спицнадель, В. Н.** Основы системного анализа : учебное пособие / В. Н. Спицнадель. - Санкт-Петербург : Изд. дом Бизнес-пресса, 2000. – 326 с.
106. **Стрелецкий, Н. С.** Основы методики расчета сооружений по предельным состояниям / Н. С. Стрелецкий // Строительство. 1952. № 9. – С. 8-15.
107. **Строганова, О. С.** Моделирование механизмов взаимодействия конструкций и сред со сложной реологией : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.02.04 / Строганова

Ольга Сергеевна; [Место защиты: Санкт-Петерб. гос. мор. техн. ун-т]. - Санкт-Петербург, 2015. - 153 с.

108. **Трусов, П. А.** Учет ледовых условий при проектировании морских нефтегазовых сооружений / П. А. Трусов // Гидротехнические сооружения. – Владивосток : Изд-во ДВГУ, 1987. – С. 89-94.

109. **Фёдоров, В. В.** Термодинамические аспекты прочности и разрушения твёрдых тел / В. В. Фёдоров. – Ташкент : Фан, 1979. - 168 с.

110. **Филимонов Н. М.** Некоторые особенности разрушения горных пород при динамическом вдавливании штампов / Н. М. Филимонов, М. Р. Мавлютов // Нефть и газ. 1965. № 5. С. 25–27.

111. **Хейсин, Д. Е.** Изменение структуры льда в зоне удара твердого тела о поверхность ледяного покрова / Д. Е. Хейсин, Н. В. Черепанов // Проблемы Арктики и Антарктики. Вып. 34. - Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. С. 79-84.

112. Хейсин Д.Е., Лихоманов В.А., Курдюмов В.А. Определение удельной энергии разрушения и контактных давлений при ударе твердого тела о лед. Труды ААНИ, т.325. Гидрометеиздат. 1975. с.210-218.

113. **Хейсин, Д. Е.** К определению контактных давлений, действующих в зоне удара судна о лёд / Д. Е. Хейсин // Проблемы Арктики и Антарктики. 1965. № 22. - С. 96-102.

114. **Хейсин, Д. Е.** Экспериментальное определение удельной энергии механического дробления льда при ударе / Д. Е. Хейсин, В. А. Лихоманов // Проблемы Арктики и Антарктики. Вып. 41, 1973. - С. 55-61.

115. **Храпатый, Н. Г.** К вопросу расчета бесконечных плит на упругом основании на удар с учетом контактных явлений / Н. Г. Храпатый, В. Г. Цуприк // Гидротехника и гидравлика : сборник статей. – Владивосток: Изд-во ДВПИ, 1976. - С. 41-54.

116. **Храпатый, Н. Г.** Экспериментальные исследования удара твердого тела о лед / Н. Г. Храпатый, В. Г. Цуприк // Труды коорд. совещаний по гидротехнике: Регулирование ледовых явлений на каскадах гидроузлов. Вып. 111. – Ленинград : Энергия, 1976. – С. 166-169.

117. **Храпатый, Н. Г.** Полунатурные исследования динамического воздействия льда на опоры гидротехнических сооружений / Н. Г. Храпатый, В. Г. Цуприк // Ледотермические явления и их учёт при возведении и эксплуатации гидроузлов и гидротехнических сооружений : материалы конференций и совещаний по гидротехнике. – Ленинград : Энергия, 1979. - С. 101-104.

118. **Храпатый, Н. Г.** Об ударе груза о лед / Н. Г. Храпатый, В. Г. Цуприк // Гидротехника и гидравлика: труды ДВПИ. Т. 60. – Владивосток : Изд-во ДВПИ, 1974. – С. 105-108.

119. **Храпатый Н.Г., Цуприк В.Г.** К вопросу расчета бесконечных плит на упругом основании с учетом контактных явлений. В сб.: "Гидротехника и гидравлика", Тр. ДВПИ, Владивосток. – 1976. – 1. – С. 41-54.

120. **Цуприк В.Г.** Обоснование применения энергетического подхода к определению параметров циклической ледовой нагрузки на шельфовые сооружения // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 4(49). С. 90–105. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/90-105>

121. Varsta, P. and Riska, K., “ Failure Process of Ice Edge Caused by Impact with a ship’s side” in Ice, Ships and Winter Navigation, Symp. in Oulu University, Oulu, Dec. 1977.

122. **Цуприк, В. Г.** Энергетическая концепция нормирования прочности льда для расчета ледовой нагрузки на вертикальные структуры / В. Г. Цуприк // Известия ВНИИГ

им. Б.Е. Веденеева, Т. 279. - Санкт-Петербург, 2016. - С. 85-105.

123. **Цуприк, В. Г.** Модель взаимодействия льдин с отдельной опорой / В. Г. Цуприк // Гидротехнические сооружения : сборник статей. - Владивосток: Изд-во ДВПИ, 1978. - С. 82-89.

124. **Цуприк, В. Г.** К определению нагрузок на цилиндрические опоры гидротехнических сооружений шельфа при динамическом воздействии ледяных полей / В. Г. Цуприк // Исследования морских гидротехнических сооружений для освоения шельфа: сб. статей. – Ленинград : Изд-во ЛПИ, 1980. - С. 104–111.

125. **Цуприк, В. Г.** Об учете характера контактных разрушений льда при нормировании нагрузки на вертикальные опоры шельфовых сооружений / В. Г. Цуприк // Борьба с ледовыми затруднениями на реках и водохранилищах при строительстве и эксплуатации ГТС : труды коорд. совещаний по гидротехнике. – Ленинград : Энергия, 1984. С. 176-180.

126. **Цуприк, В. Г.** Модель разрушения морского льда при динамическом сжатии / В. Г. Цуприк // Гидротехнические сооружения : сб. статей. – Владивосток : Изд-во ДВПИ, 1985. - С. 76-84.

127. **Цуприк, В. Г.** О генерации циклической нагрузки при разрушении льда на опорах шельфовых сооружений / В. Г. Цуприк, А. Т. Беккер // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Т. 284. - Санкт-Петербург, 2017. - С. 102-117.

128. **Цуприк, В. Г.** Методология определения ледовой нагрузки на ледостойкие основания с использованием удельной энергии разрушения льда / В. Г. Цуприк // Полярная механика : материалы междунар. науч. конференции. - Владивосток, 2016. - С. 306-320.

129. **Цуприк, В. Г.** Экспериментальное изучение удельной энергии механического разрушения морского льда для использования ее в расчетах ледовой нагрузки на опоры гидротехнических сооружений / В. Г. Цуприк // Гидротехнические сооружения : сб. статей. - Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1984. - С. 121-127.

130. **Цуприк, В. Г.** Об учете механики разрушения льда при его испытаниях на контактную прочность / В. Г. Цуприк // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2015. Т. 277. Санкт-Петербург, 2015. - С. 80-92.

131. **Цуприк, В. Г.** Теоретические исследования удельной энергии механического разрушения морского льда / В. Г. Цуприк // Вестник НГУ. Серия: Математика, Механика, Информатика. Новосибирск, 2013. - С. 119-125.

132. **Цуприк, В. Г.** Об учете влияния диаметра опор и толщины льда при определении ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения шельфа / В. Г. Цуприк // Исследования морских гидротехнических сооружений для освоения шельфа : сб. статей. - Ленинград : Изд-во ЛПИ, 1980. - С. 84–94.

133. **Цуприк, В. Г.** Законы разрушения кромки ледового покрова при его взаимодействии с поверхностью опоры Горный инф.-аналит. бюлл. (науч.-техн. журнал). Спец. выпуск № 5 : Проблемы освоения георесурсов Дальнего востока». – Москва : Горная книга, 2014. С. 114-133.

134. **Цуприк, В. Г.** К методике определения ледовой нагрузки на вертикальные опоры морских ГТС / В. Г. Цуприк // Борьба с ледовыми затруднениями на реках и водохранилищах при строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений : материалы конференций и совещаний по гидротехнике. - Ленинград : Энергоатомиздат, 1984. - С. 180–184.

135. **Цуприк, В.Г.** Методологические аспекты обоснования рисков при определении надежности сложных технических систем типа морских ледостойких оснований / В. Г. Цуприк // Вестник Дальневост. гос. техн. ун-та : электрон. периодич. издание. 2011. № 1(6).

136. **Цуприк, В. Г.** Влияние угла скола в исследованиях удельной энергии механического разрушения морского льда / В. Г. Цуприк // Горный инф.-аналит. бюлл. (науч.-техн. журнал). Спец. выпуск № 3 : Проблемы освоения георесурсов Дальнего востока». – Москва : Горная книга, 2013. С. 125-135.

137. **Цуприк, В. Г.** Концептуальное моделирование системы обеспечения проектной надежности оснований морских ледостойких сооружений / В. Г. Цуприк // Вестник Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова. 2021. Т. 13. № 6. – С. 819–831.

138. **Цуприк, В. Г.** Закономерности изменения параметров процесса динамического взаимодействия ледяного поля с неподвижными опорами ГТС / В. Г. Цуприк // Гидротехнические сооружения : сб. статей. – Владивосток: Изд-во ДВПИ, 1980. – С. 24-32.

139. **Цуприк, В. Г.** О механизме генерации циклической ледовой нагрузки на шельфовые сооружения от разрушения льда (обзор) / В. Г. Цуприк // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2017. – С. 47-63.

140. **Цуприк, В. Г.** Об учёте влияния диаметра опор и толщины льда при определении ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения шельфа / В. Г. Цуприк // Исследования морских гидротехнических сооружений для освоения шельфа : сб. статей. – Ленинград : Изд-во ЛПИ, 1980. – С. 84-94.

141. **Цуриков, В. Л.** О динамической твердости льда Каспийского моря / В. Л. Цуриков, Л. Е. Веселова // Исследование льдов Южных морей СССР : сб. статей. – Москва : Наука, 1973. – С. 68-80.

142. **Черепанов, Г. П.** Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – Москва : Наука, 1974. – С. 486-494.

143. **Черепанов, Н. В.** Классификация льдов природных водоёмов / Н. В. Черепанов // Проблемы Арктики и Антарктики. Вып. 42. 1974. – С. 54-58.

144. **Шапиро, Г. С.** Об уравнениях деформирования льда / Г. С. Шапиро // Механика и физика льда. – Москва : Наука, 1983. – С. 164–165.

145. **Шехурдин В. К.** Удельная энергоёмкость разрушения горных пород адекватна пределу прочности / В. К. Шехурдин // Горная промышленность. 1999. № 6. – С. 38-39.

146. **Щапов, Н. М.** Удар льдин о сооружения / Н. М. Щапов // Гидротехническое строительство. 1933. № 2. – С. 26-28.

147. **Aleksandrov, A.** Impulse model Estimation of Local and Global Ice Load on Fixed Off-shore Ice-Resistant Structures / A. Aleksandrov, R. Matantsev // Proc. 25th Int. Offshore and Polar Eng. Conference (ISOPE), Kona, USA, 2015. – P. 1777-1785.

148. **API RN 2N.** Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Structures and pipelines for Arctic Condition. 2nd edition, 1995. American Petroleum Institute, Washington, 2005. – 82 p.

149. **Appolonov, E. M.** Research of Arctic ice dynamic strength with the help of Drop Ball Tests / E. M. Appolonov // Report from WP3 of ARCDEV project supported by the EC Transport programme. – Saint-Petersburg: Krylov Shipbuilding Research Institute, 1999. – 128 p.

150. **Appolonov, E. M.** The method for refinement of analytic of ship hull/ice impact interaction basing on the statistic analysis of model and full scale experiments / E.M. Appolonov, A.B. Nesterov, Yu.A. Zimnitsky // Proc. Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition (POAC). Helsinki. 1999. V. 3. – P. 949-955.

151. **Ashby, M. F.** The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states / M. F. Ashby, S. D. Hallam // Acta Metallurgica. V. 34/3, 1986. – P. 497-510.

152. **Assur, A.** Composition of sea ice and its tensile strength / A. Assur // In: Arctic Sea Ice. Washington, National Academy of Science, National Res. Council. Publ. 598. 1958. – P. 106-138.

153. **Barker, A.** Sliding Resistance of Grounded Spray Ice Structures / A. Barker, G. W. Timco

// Canadian Hydraulics Centre National Res. Council of Canada. Tech. Report CHC-TR-017. Ottawa, Canada. - 87 p.

154. **Barrette, P.** Laboratory-Scale Indentation of Ice / P. Barrette, J. Pond, C. Li, I. Jordaan // National Research Council Program on Energy Research and Development (PERD), PERD/CHC Report 4-81. 2003. – 370 p.

155. **Bekker, A.T.** The ice load formation modeling in the interaction of ice plate with a cylindrical indenter / A. T. Bekker // Proc. 25th Int Ocean & Polar Eng Conference ISOPE, Kona, USA, 2015. - P. 1723-1729.

156. **Bekker, A. T.** Energetical Concept of Rationing the Ice Strength for Calculation Ice Load on Offshore Vertical Structures / A. T. Bekker, V. G. Tsuprik // Proc. 26th Annual Int. Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE). Rhodes, Greece, 2016. - P. 1282-1289.

157. **Bekker, A. T.** Experimental study of ice-cylindrical pile interaction / A. T. Bekker, V. I. Seliverstov // Proc. 3rd Intern. Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE). Singapore, 1993. V 2. - P. 529-531.

158. **Bergdahl, L.** Two lighthouses damaged by ice / L. Bergdahl // Proc. IAHR Symposium on Ice and Its Action on Hydraulic Structures. Leningrad. 1972. - P. 234-238.

159. **Bjerkås, M.** Global ice loads on the lighthouse Norströmsgrund in the winter 2001 / Proc. Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Trondheim, 2003. - P. 829-838.

160. **Bjerkås, M.** Review of measured full scale ice loads to fixed structures / M. Bjerkås // Proc. 26th Int. Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (ISOPE), June 10-15, 2007, San Diego. - P. 1-10.

161. **Bjerkås, M.** Ice induced vibrations-observations of a full scale lock-in event / M. Bjerkås, H.S. Alsos, A. Meese // Proc. 23rd Int. Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Alaska, USA, June 30-July 5, 2013.

162. **Blanchet, D.** Global first-year ice loads: scale effect and non-simultaneous failure / D. Blanchet, S. J. DeFranco // Proc. IAHR Ice Symposium, Beijing, 1996. - P. 203-213.

163. **Blenkarn K.A.** Measurement and analysis of ice forces on Cook Inlet structures. Proc. 2nd Offsh. Technology Conf., Houston, TX, OTC 1261, 1970. vol. II, pp. 365–378.

164. **Bruneau, S.** Laboratory indentation tests simulating ice structure interactions using cone-shaped ice samples and steel plates / S. Bruneau, B. Colbourne, R. Dragt // Proc. 22nd Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Espoo, Finland, 2013. – P. 122-132.

165. **CAN/CSA-S471-92** General Requirements, Design Criteria, Environment, Loads. National Standard of Canada, 2004.

166. **Cole, D. M.** The microstructure of ice and its influence on mechanical properties / D. M. Cole // Engineering Fracture Mechanics, 2001. V. 68(17-18). - P. 1797–1822.

167. **Cole, D. M.** Observations of banding in first-year Arctic sea ice / D. M. Cole, H. Eicken, H. K. Frey et al. // J. Geoph. Res., V. 109, C08012, 2004. – P. 222-229.

168. **Comfort, G.** Field measurement of pack ice stresses / G. Comfort, R. Ritch // Proc 9th Int. Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (ISOPE), Houston, 1990. V. 4. - P. 177–181.

169. **Croasdale, K. R.** Ice Structure Interaction: Current State of Knowledge & Implications for Future Developments / K. R. Croasdale // Proc. Conference of Development of the Russian Arctic Offshore (RAO), St. Petersburg, September 23-26, 1997.

170. **Croasdale, K. R.** Ice forces on marine structures / K. R. Croasdale // Proc. IAHR Ice Symposium, Hanover, 1975. - P. 315-337.

171. **Croasdale, K. R.** Indentation tests to investigate ice pressures on vertical piers / K. R. Croasdale, N. R. Morgenstern, J. B. Nuttall // J. Glaciology, 19(81), 1977. - P. 309-312.

172. **Croasdale, K. R.** Ice Investigations at a Beaufort Sea Caisson / K. R. Croasdale // Report to Public Works. K.R. Croasdale and Associates, Ltd. Calgary, 1985.

173. **Croasdale K.E.** The Nutcracker ice strength Tester and its operation in the Beaufort sea. IAHR. Symp.- Ice and its Action on Hydraulic structures. Reykjavik, Iceland, 1970, pp 4-6.

174. **Daley, C.** The role of discrete failures in local ice loads / C. Daley, J. Tuhkuri, K. Riska // Cold Regions Science and Technology, 27, 1998. P. 197-211.
175. **Daley, C.** Ice edge contact and failure / C. Daley // Cold Regions Science and Technology. V. 21, 1992. - P. 1-23.
176. **Daley, C.** Compilation of Medium Scale Ice Indentation (MSI) Test Results and Comparison to ASPPR / C. Daley // National Res. Council Canada, 1994. - P.105–117.
177. **Daley, C.** Conceptual Framework for an Ice Load Model / C. Daley, K. Riska. PERD, National Energy Board, Calgary, 1995. – 41 p.
178. **Danish Standard 410.** Code of Practice for Loads for the Design of Structures, 1998.
179. **Di, S.** Effects of model size and particle size on the response of sea-ice samples created with a hexagonal-close-packing pattern indiscrete-element method simulations / S. Di, Y. Xue, X. Bai, Q. Wang // J. Particuology, 36, 2018. - P. 106–113.
180. **Engelbrektson, A.** Dynamic ice loads on lighthouse structures / A. Engelbrektson // Proc. 4th Int. Conference on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC), St. John's, Canada, 1977. – P. 654–864.
181. **Engelbrektson, A.** An ice-structure interaction model based on observations in the Gulf of Bothnia / A. Engelbrektson // Proc. 4th Int. Conference on Port and Ocean Engg under Arctic Conditions (POAC), 1989, V. 1. - P. 504–517.
182. **Engelbrektson, A.** A Refined Ice/Structure Interaction Model Based on Observations in the Gulf of Bothnia / A. Engelbrektson // OMAE Arctic/Polar Technology, ASME, Stockholm, 1997. V. IV. – P. 373-375.
183. **Epifanov, V. P.** Method and device for ice strength measurement / V. P. Epifanov // Proc. 13th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition (POAC). Murmansk. V. 3. 1995. - P. 110-121.
184. **Eranti, E.** Ice Forces in Dynamic Ice Structure Interaction. Theory and applications / E. Eranti // Int. J. Offshore and Polar Engineering. V. 2. No. 3. 1992. - 81 p.
185. **Eranti, E.** A novel offshore windmill foundation for heavy ice conditions / E. Eranti, E. Lehtonen, H. Pukkila, L. Rantala // Proc. 30th Int. Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), ASME, 2011. Rotterdam, 1999. - 8 p.
186. **Farafonov, A. E.** Experimental Studies of Ice Cover Inhomogeneity / A. E. Farafonov, V. I. Seliverstov, S. G. Gomolski // Proc. 11-th Int. Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), V. 1, Stavanger, 2001. - P. 744-748.
187. **Feng, D.** Influence of Cohesive Stiffness on Cohesive Element Method Based Simulation of Ice-Structure Interaction / D. Feng, J. Zhang, K.T. Yap, S. D. Pang // Proc. 24th IAHR Int Symposium on Ice, Vladivostok, 2018. - P. 320-327.
188. **Finn, D. W.** Flow of Crushed Ice: Physical and Mechanical Properties and Behaviour / I. J. Jordaan, S. K. Singh, P. Spencer. Memorial University of Newfoundland Report, St. John's, V. 2, 1989. 104 p.
189. **Flint, A. R.** The treatment of safety for marine structures design codex / A. R. Flint // Proc. ASCE, V. 107, 1981. - P. 671-690.
190. **Fransson, L.** Recommendations for design of offshore foundations exposed to ice loads / L. Fransson, L. Bergdahl. Stockholm, Elforsk, 2009. - 42 p.
191. **Fransson, L.** Observations of the failure process in ice blocks crushed by a flat indenter / L. Fransson, T. Olofsson, J. Sandkvist // Proc. 11th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), St. John's, Canada, 1991. - P. 501-514.
192. **Frederking, R. M.** Review of Standards for Ice Forces on Port Structures / R. M. Frederking // Proc. 5th Int. Conference on Cold Regions Engineering. Quebec, Canada, 2012. - P. 1-11.
193. **Frederking, R. M.** Comparison of Int. Codes for Ice Loads on Offshore Structures / R. Frederking. PERD/CHC Report 11-20, Project 142211/533102, National Res. Council of Canada, Ottawa, 1998. - 50 p.
194. **Frederking, R. M.** Ice pressure variations during indentation / R. Frederking // Proc. 7th

Int. Symposium on Ice (IAHR), Saint-Petersburg, 2004. V. 2. - P. 307-314.

195. **Frederking, R. M.** Experimental study of edge loading of ice plates / R. Frederking, L.W. Gold // Canadian Geotechnical J., 1975, 12. - P. 456-463.

196. **Frederking, R. M.** Ice Pressure Distribution from First-Year Sea Ice Features Interacting with the Molikpaq in the Beaufort Sea / R. Frederking, G.W. Timco, B. Wright // Proc. 11th Int. Off-shore and Polar Engineering Conference (ISOPE), 1999, Brest, France. - P. 541-548.

197. **Frederking, R. M.** Sea Ice Floe Impact Experiments / R. M. Frederking, G.W. Timco, B. Wright, R. Reid. Tech. Report HYD-TR-038 PERD/CHC, 8-95, 1999.

198. **Frederking, R. M.** Field tests of ice indentation of medium scale Hobson's Choice Ice Island / R. M. Frederking, I. J. Jordaan, J. S. McCallum // Proc. 10th IAHR Symposium on Ice, Espoo Finland, 1990, V. 2. P. 931-944.

199. **Gagnon, R. E.** A large double-pendulum device to study load, pressure distribution and structure damage during ice impact tests in the lab / R. E. Gagnon, C. Daley, B. Colbourne // Proc. 23rd Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Trondheim, 2015. - P. 1-10.

200. **Gagnon, R. E.** An explanation for the Molikpaq / R. E. Gagnon // J. Cold Regions Science and Technology. No. 82, 2012. - P. 75-93.

201. **Gagnon, R. E.** Evidence for pressure Melting and heat generation by viscous flow of liquid in indentation and impact experiments on ice / R. E. Gagnon, J. Mølgaard // Annals of Glaciology, 1991. No. 15. - P. 254-260.

202. **Gagnon, R. E.** Melt-layer thickness measurements during crushing experiments on freshwater ice / R. E. Gagnon // J. Glaciology, V. 40, 134, 1994. - P. 119-124.

203. **Gagnon, R. E.** Generation of melt during crushing experiments on freshwater ice / R. E. Gagnon // Cold Regions Science and Technology, 1994, V. 22. - P. 385-398.

204. **Gagnon, R. E.** Analysis of visual data from medium scale indentation experiments at Hobson's Choice Ice Island / R. E. Gagnon // Cold Region Science Technology, 28. - P. 45-58.

205. **Gagnon, R. E.** Bugden Ritch R. Preliminary testing of a new ice impact panel / R. E. Gagnon // Proc. 20th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Luleå, 2009. - 10 p.

206. **Gagnon, R. E.** In situ thermal profiles and laboratory impact experiments on iceberg ice / P.H. Gammon // J. Glaciology. 1997. V. 1-3, 145. - P. 569-582.

207. **Garcia, N. B.** Ice penetration tests / N.B. Garcia, D. Farrell, M. Mellor // Cold Regions Science and Technology. 1985. 11(3). - P. 223-235.

208. **Geotech Arctic Services.** Flow of Crushed Ice: Physical and Mechanical Properties and Behaviour. V. 1. Report for Canadian Coast Guard, British Petroleum Plc, Esso Resources Ltd., Gulf Canada Resources Ltd., Minerals Management Service, Mobil Research and Development Corp., National Res. Council Canada and Petro-Canada Resources Ltd, Calgary, Alta, 1989. - 450 p.

209. **Gerard, R.** Mode of Failure and the Analysis of Ice Loads on Bridge Piers / R. Gerard // Proc. 4th IAHR Symposium on Ice Problems, Lulea, Sweden, 1978. - P. 335-348.

210. **Glen, I.** Ice impact pressure and load: investigation by laboratory experiments and ship trials / I. Glen, G. Comfort // Proc. 7th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Helsinki, 1983. V. I. - P. 516-533.

211. **Gribanov, I.** Cohesive zone micromechanical model for compressive and tensile failure of polycrystalline ice / I. Gribanov, R. Taylor, R. Sarracino // Engineering Fracture Mechanics. 196. 2018. - P. 142-155.

212. **Gudimetla, P. S. R.** Strength and Pressure Profiles from Conical Ice Crushing Experiments / P. S. R. Gudimetla, B. Colbourne, C. Daley et al. ICETECH-12-132-RF.

213. **Gürtner, A.** Numerical modelling of a full scale ice event / A. Gürtner, M. Bjerkås, J. Forsberg, D. Hilding // Proc. 20th IAHR Int. Symposium on Ice, 2010. - P. 33-38.

214. **Habib, K. B.** Experimental study of dynamics during crushing of freshwater truncated conical ice specimens / K. B. Habib, R.S. Taylor, S. Bruneau, I. Jordaan // Proc. ASME 34rd Int.

Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engg (OMAE), St. John's, Canada, 2015. – P. 1-10.

215. **Hallam, S. D.** A study of cracks in polycrystalline ice under uniaxial compression / S. D. Hallam, P. Duval, M. F. Ashby // *Le J. de Physique Colloques*, 1987. No. 48(C1). – P. 303-311.

216. **Han, H.** The uniaxial compressive strength of the Arctic summer sea ice / H. Han, Z. Li, W. Huang et al. // *Acta Oceanologica Sinica*, 2015. No. 34(1). – P. 129–136.

217. **Hawkes, M.** Deformation and fracture of ice under uniaxial stress / I. Hawkes, M. Mellor // *J. Glaciology*. 1972. V. 11, No. 61. – P. 103–131.

218. **Haynes, F. D.** Ice forces measurements on the Pembina river / F. D. Haynes, D. E. Nevel, D. R. Farrell // *US CRREL TR 269*. Hanover, USA, 1975. – P. 1–12.

219. **Hendrikse, H.** Experimental validation of a model for prediction of dynamic ice-structure interaction / H. Hendrikse, G. Ziemer, C. C. Owen // *J. Cold Regions Science and Technology*, 151, 2018. – P. 345–358.

220. **Herman, A.** Discrete-element bonded-particle sea ice model design model description and implementation / A. Herman // *Geoscient. Model Dev.*, 9, 2015. – P. 1219–1241.

221. **Hilding, D.** Simulation of ice action loads on offshore structures / D. Hilding, J. Forsberg, F. Gürtner // *Proc. 8th European LS-DYNA Users Conference*, Strasbourg. 2011. 12 p. ISSN 2167-1273

222. **Hirayama, K.** Ice forces of vertical indentation and penetration / K. Hirayama, J. Schwarz, H. C. Wu // *Proc. IAHR Ice Symposium*, Hanover, 1995. – P. 442-445.

223. **Hirayama, K.** Ice forces on vertical piles / K. Hirayama, J. Schwarz, H. C. Wu // *Proc. IAHR Ice Symposium*. Hanover, USA. 1975. – P. 429-441.

224. **Hossain, R.** An assessment of sensitivity of the self-excited modelling approach for simulating dynamic ice-structure interactions to changes in temperature and scale effects / R. Hossain, R. Taylor, L. Moro // *J. Ocean Engineering*, 165, 2018. – P. 410–425.

225. **Hou, J.** Structural Design for the Ice-Resistant Platform / J. Hou, W. Shao // *Proc. 24th Int. Ocean and Polar Engg Conference (ISOPE)*. Busan, 2014. – P. 1118-1124.

226. **Huang, G.** A dynamic model for ice-induced vibration of structures / G. Huang, P. Liu // *J. Offshore Mechanics Arctic Engg*. 2009. V.131. 011501.

227. **IAHR Recommendations on Testing Methods of Ice.** 4th Report of working group on testing methods in ice // *Proc. IAHR Ice Symposium*, Hamburg, 1984, V. 4. – P. 1-35.

228. **Ice Island Study.** C-CORE for Minerals Management Service, US Department of the Interior. Report No. R-05-014-241, V. 1.0, 2005. – 147 p.

229. **Inoue, M.** Field indentation test on cylindrical structures / M. Inoue, N. Koma // *Proc. Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*. Narssarssuaq, 1985. 2. – P. 555-569.

230. **ISO/FDIS 19906.** Petroleum and natural gas industrie. Arctic offshore structures, 2010.

231. **Iyer, S. H.** Size effects in ice and their influence on the structural design of offshore structures / S. H. Iyer // *Proc. Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*. Espoo, Helsinki, 1983. – P. 414-432.

232. **Jefferies, M. G.** Molikpaq dynamic ice-structure interaction at Amauligak / M. Jefferies // *JIP Workshop on Ice Induced Vibrations*, Oslo, Norway, 2010.

233. **Ji, X.** Physical mechanism of ice/structure interaction / X. Ji, E. Oterkus // *J. Glaciology*. 2018. 64(244). – P. 197–207.

234. Ji, X., & Oterkus, E. *A novel dynamic ice-structure interaction model for ice-induced vibrations. 2016 Techno-Ocean (Techno-Ocean)*. 2016. Pp. 70-73. doi:10.1109/techno-ocean.2016.7890750

235. Ji X., Oterkus E. A dynamic ice-structure interaction model for ice-induced vibrations by using van der pol equation. *Ocean Engineering* 128 (2016) Pp. 147–152

236. **Joensuu A.** Contact between ice and structure / A. Joensuu, K. Riska // *Laboratory of Naval Architecture and Marine Engineering*, Helsinki University of Technology. Report M-88.Espoo,

Finland, 1989.

237. **Johnston M. E.** An overview of ice loads on slender structures / M. E. Johnston, G.W. Timco, R. Frederking // Proc. 18th Int. Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engg (OMAE). St. John's, Canada. 1999. - 10 p.

238. **Jordaan, I. J.** Mechanics of ice-structure interaction / I. J. Jordaan // Engineering Fracture Mechanics. 2001. 68. – P. 1923-1960.

239. **Jordaan, I. J.** Mechanics of ice compressive failure, probabilistic averaging and design load estimation / I. J. Jordaan, R. M. Frederking, C. Li // Proc. IAHR Ice Symposium, 2006.

240. **Jordaan, I. J.** Loads and Vibration Induced by Compressive Failure of Ice. Cold Regions Engineering // Proc. 6th Int. Specialty Conference, ASCE, Hanover, USA. P. 638-649.

241. **Jordaan, I. J.** Dynamics of the Ice-Crushing Process / I. J. Jordaan, G.W. Timco // J. Glaciology. 1988. V. 34, No. 118. – P. 318-325.

242. **Jordaan, I. J.** Probabilistic analysis of local ice pressures / I. J. Jordaan, M.A. Maes, P.W. Brown et al. // J. Offshore Mechanics Arctic Engg. 115. 1993. – P. 83-89.

243. **Jordaan, I. J.** Development of new ice load models / I. J. Jordaan, F. McKenna, R. Frederking et al. // Report for Canada Oil and Gas Lands Administration (COGLA) by C-CORE, Memorial University, St. John's, Canada, 1990. – 205 p.

244. **Kärnä, T.** Symmetric and asymmetric flaking process / T. Kärnä, E. Järvinen // Proc. 15th Int. Conference on Port and Ocean Engg under Arctic Cond (POAC). V. 3. Helsinki, 1999. - P. 988-1000.

245. **Kärnä, T.** A straightforward technique for analyzing structural response to dynamic ice action / T. Kärnä, R. Turnunen // Proc. 9th Int. Offshore Mechanics and Arctic Engg (OMAE). V. IV, Houston, USA, 1990. – P. 135–142.

246. **Kärnä, T.** A procedure for dynamic soil-structure-ice interaction / T. Kärnä // Proc. 2nd Int. Offshore and Polar Engineering Conference. V. 2., San Francisco, 1992. - P.764 –771.

247. **Kärnä, T.** Finite ice failure depth in penetration of a vertical indenter into an ice edge / T. Kärnä // Annals of Glaciology. 1994. No. 19. - P. 114-120.

248. **Kärnä, T.** Dynamic response of narrow structures to ice crushing / T. Kärnä, R. Turunen // Cold Regions Science and Tech. 1989. No. 17. – P. 173-187.

249. **Kärnä, T.** A spectral model for forces due to ice crushing / T. Kärnä, Y. Qu, Q. J. Yue et al. // J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering (JMAE). V. 129. 2007. - P. 138-145.

250. **Kärnä, T.** Tests On Dynamic Ice-Structure Interaction / T. Kärnä, K. Kolari, P. Jochmann et al. // Proc. 22nd Int Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engg (OMAE). Mexico. 2003. - P. 323-829.

251. **Kärnä, T.** Analysis of the size effect in ice crushing / T. Kärnä, Q. Yue // VTT Technical Research Centre of Finland. Report RTE-IR-6. 2005. - 167 p.

252. **Kärnä, T.** A numerical model for dynamic icestructure interaction / T. Kärnä, K. Kamesaki, H. Tsukuda // Computers and Structures. 1999. No. 72. – P. 645-658.

253. **Kärnä, T.** Rate effects in brittle ice crushing / T. Kärnä, A. Muhonen // Proc. Conference of Port Ocean Engg under Arctic Conditions (POAC). Hamburg, 1993. - P. 59–71.

254. Ji X., Karr D. G., & Oterkus E. *A non-simultaneous dynamic ice-structure interaction model.* Ocean Engineering. 2018:166, 278–289. doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.08.032

255. **Karulin, E.** Field Indentation Tests of Vertical Semi-Cylinder on First-Year Ice / E. Karulin et al. // Proc. 22nd IAHR Int. Symposium on Ice, Singapore, 2014. - P. 179-185.

256. **Kavanagh, M.** Observations on the time-dependent fracture of ice / M. Kavanagh, B. O'Rourke, I. Jordaan, R. Taylor // Proc. Int. Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE). St. John's, Canada. ASME, 2015. - P. 420-423.

257. **Kendall, K.** Complexities of Compression Failure / K. Kendall // Proc. Royal Society of London. A 361. – P. 245-263.

258. **Kennedy, K.P.** Dynamic activity in medium-scale ice indentation tests / K.P Kennedy, I.

J. Jordaan, M.A. Maes, A. Prodanovic // Cold Regions Science and Technology. 1994. 22. - P. 253-267.

259. **Kim, E.** Laboratory experiments on shared-energy collisions between freshwater ice blocks and a floating steel structure / E. Kim, M. Storheim, J. Amdahl et al. // Ships and Offshore Structures, 2015. - P. 25-27.

260. **Kim, E.** A phenomenological explanation of the pressure–area relationship for the indentation of ice: Two size effects in spherical indentation experiments / E. Kim, R.M. Schulson // Cold Regions Science and Technology. 2015, 115. - P. 48–55.

261. **Kim, E.** Mechanisms governing failure of ice beneath a spherically-shaped indenter / E. Kim, N. Golding, E.M. Schulson et al. // Cold Regions Science and Technology, 2012, 78. - P. 46–63.

262. **Kim, E.** Experimental Investigations of the Energy Absorption Capacity of Ice During Crushing: Is the Specific Energy Scale Independent / E. Kim, K.V. Hoyland // Proc. 22nd IAHR Int. Symposium on Ice, Singapore, 2014. - P. 163-170.

263. **Kim, L. V.** Parameter relationships of ice-structure interaction process / L. V. Kim, V. G. Tsuprik // Proc. 24th Int. Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), Busan, Korea. 2014. - P. 1132-1134.

264. **Kinnunen, A.** An energy model for ice crushing in ice-structure impact / A. Kinnunen, M. Tikanmäki, J. Heinonen // Proc. 23rd IAHR Int. Symposium on Ice. Ann Arbor, USA, 2015. P. 1-9.

265. **Kivisild, H.R.** In-situ test for ice strength measurements / H. R. Kivisild, S.H. Iyer // Ocean Engineering, 1975. V.3. No. 5. - P. 329-342.

266. **Konuk, I.** A cohesive element framework for dynamic ice-structure interaction problems – Part I: Review and Formulation / I. Konuk, A. Gürtner, S. Yu // Proc. ASME 28th Int. Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (ISOPE), 2009. – P. 230-235.

267. **Kovacs, A.** Sea Ice. Part I. Bulk Salinity Versus Ice Floe Thickness / A. Kovacs // US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory. 1995. 322 p.

268. **Kovalev, S. M.** Application of a borehole jack for determining the local strength of fresh and sea ice / S. M. Kovalev, V. G. Korostelev, V. A. Nikitin et al. // Proc. IAHR 17th Int. Symposium on Ice. Saint-Petersburg. 2004. - P. 147–153.

269. **Krupina, N.** Experimental studies on anisotropy and strength properties of model ice / N. Krupina, A. Chernov, V. Likhomanov // Proc. 19th IAHR Int. Symposium on Ice. Vancouver, 2008. - P. 447-463.

270. **Kry, P.R.** A statistical prediction of effective ice crushing stress on wide structure / P. R. Kry // Proc. 4th IAHR Symposium on Ice Problems, Lulea, Sweden, 1978. - P. 33–47.

271. **Kujala, P.** Modeling of the ice edge failure process with curved failure surfaces / P. Kujala // Proc. Int. Symp on Applied Snow and Ice Research. Rovaniemi, Finland, 1993. - P. 1-16.

272. **Kujala, P.** Statistical analysis of the ice load measurements onboard MT Uikku during the ARCDEV-voyage in 1998 / P. Kujala, K. Riska // Report from WP8 of ARCDEV-project supported by the EC Transport-programme, Helsinki University of Technology, Ship Laboratory, Report D-51. Helsinki.1999. – 139 p.

273. **Concrete solutions – Kvaerner ASA, Norway.** – URL : www.kvaerner.com (Дата обращения 11.03.2022).

274. **Lake, R. A.** Salt Rejection by Sea Ice During Growth / R.A. Lake, E. L. Lewis // J. Geophys. Res., V. 75/3. 1970. - P. 583-597

275. **Li, C.** Simulation of Probabilistic averaging in ice load estimation / C. Li, R. Frederking, I. Jordaan // Proc. IAHR 18th Int Symp on Ice, Sapporo, 2005. V. 1. – P. 215-222.

276. **Loset, S.** An Overview of the Influence of Structure Width and Ice Thickness on the Global Ice Load / S. Loset, K. Skhinek, E. Uvarova / Proc. 15th Int. Conference on Port and Ocean Engg under Arctic Conditions (POAC), Espoo, Finland. 1999. – P. 210-216.

277. **Määttänen, M.** Experiences of ice forces against a steel lighthouse mounted on the seabed and proposed constructional refinements / M. Määttänen // Proc. 3rd Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). V. 2. Fairbanks, USA, 1975. – P. 857–869.

278. **Määttänen, M.** Ice-force measurements at the Gulf of Bothniaby the Instrumented Ketil lighthouse / M. Määttänen // Proc. 4th Int Conference Port and Ocean Engg Arctic Conditions (POAC). Newfoundland, Canada. V. 2. 1978. - P. 730-740.
279. **Määttänen, M.** Stability of self-excited ice-induced structural vibrations / M. Määttänen // Proc. 4th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), St. John's, Canada, 1977. V. II. - P. 684-694.
280. **Määttänen, M.** Ice induced frequency lock-in vibrations - converging towards consensus / M. Määttänen // Proc. 23rd Int. Conference Port and Ocean Engg under Arctic Conditions (POAC). V. 1. Trondheim, Norway. 2015. - P. 1-12.
281. **Määttänen, M.** On conditions for the rise of self-excited ice-induced autonomous oscillations in slender marine pile structures / M. Määttänen // Finnish-Swedish Winter Navigation Board. Res. report No. 25, Helsinki, Finland. 1975. - 180 p.
282. **Määttänen, M.** Experiences with vibration isolated lighthouses / M. Määttänen // Proc. Int. Conference Port and Ocean Engg under Arctic Conditions (POAC), V. 1. 1981. - P. 491-501.
283. **Määttänen, M.** Laboratory tests for dynamic ice-structure interaction / M. Määttänen // Eng. Struct. 1981. V. 3. - P. 111-115.
284. **Määttänen, M.** Dynamic ice-structure interaction during continuous crushing / M. Määttänen // U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Hanover. NH 03755. CRREL Report 83-5. 1983. - 53 p.
285. **Määttänen, M.** Novel Ice Induced Vibration Testing in a Large-scale Facility : Deciphering Ice Induced Vibrations / M. Määttänen, S. Løset, A. Metrikine et al. // Proc. 21st IAHR Int. Symposium: Ice Research for a Sustainable Environment. Part 1. Dalian. 2012. - P. 946-958.
286. **Määttänen, M.** Ice crushing tests with variable structural flexibility / M. Määttänen, P. Marjavaara, S. Saarinen et al. // Cold Regions Science and Technology. 2011. V. 67. - P. 120-128.
287. **Määttänen, M.** Experience with vibration isolated lighthouses / M. Määttänen // Proc. Off-shore Technology Conference (OTC), 1262, Dallas, USA. 1977. - P. 379-385.
288. **Maser, K. R.** The Interpretation of small scale data for ice / K. R. Maser // Proc. Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Trondheim, 1971. V. 1. - P. 632-657.
289. **Masterson, D. M.** An Arctic Engineer's Story 1971 to 2005 / D. M. Masterson // Canadian J. Civil Engineering. 2019. - 67 p.
290. **Masterson, D. M.** Load contact pressures in ship/ice and structure/ice interactions / D. M. Masterson, R. M. Frederking // Cold Region Science and Technology. 1993. V. 21. - P. 169-185.
291. **Masterson, D. M.** A revised ice pressure-area curve. Recent Development of Offshore Engineering in Cold Regions / D. M. Masterson, R.M.W. Frederking, B. Wright et al. // Proc. Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Dalian, China, 2007. P. 77-81.
292. **Masterson, D. M.** Ice force versus aspect ratio / D. M. Masterson, P.A. Spencer // Proc. IUTAM Symposium on Scaling Laws in Ice Mechanics and Ice Dynamics, 2007. - P. 31-42.
293. **Matlock, H.** A model for the prediction of ice -structure interaction / H. Matlock, W. Dawkins, J. Panak // J. Engineering Mechanics. ASCE, EM4. 1969. - P. 1083-1092.
294. **McKenna, R. F.** Analysis of damage and energy flow in the crushed layer during rapid ice loading / R. F. McKenna, I. J. Jordaan, J. Xiao // Proc. 10th IAHR Ice Symposium, Espoo, Finland, 1990. V. II. - P. 231-245.
295. **McQueen, H.** Modified Matlock-Duffing Model for Two-Dimensional Ice-Induced Vibrations of Offshore Structures With Geometric Nonlinearities / H. McQueen, N. A. Srinil // J. Offshore Mech. Arct. Engg. 138(1). No. OMAE-15-1046, 2009. - 9 p.
296. **Meaney, R.** Analysis of medium scale ice-indentation tests / R. Meaney, I. J. Jordaan, J. Xiao // Cold Regions Science and Technology. 24. 1996. - P. 279-287.
297. **Metge, M.** On measuring large scale ice forces; Hans Island / M. Metge, B. Danielewicz, R. Hoare // Proc. 6th Int. Conference on Port and Ocean Engg under Arctic Conditions (POAC). V. II. Quebec, Canada. 1981. - P. 629-642

298. **Michel, B.** Ice mechanics / B. Michel // Les presses de l'université Lavoie. Quebec, Canada. 1978. – 499 p.
299. **Michel, B.** Indentation of an S2 floating ice sheet in the brittle range / B. Michel, D. Blanchet // *Annals of Glaciology*. 1983. No. 4. - P. 180-187.
300. **Michel, B.** Mechanics and theory of indentation of ice plates / B. Michel, N. Toussaint // *J. Glaciology*. 1977. V. 19. No. 8. - P. 285–300.
301. Muggeridge, K., and Jordaan, I.J., Microstructural change in ice: III. Observations from an iceberg impact zone, *Journal of Glaciology*, 1999; 45(151). P. 423-455.
302. **Muhonen, A.** Laboratory indentation tests with thick freshwater ice / A. Muhonen, T. Karna, K. Riska et al. // *VTT Research Notes*. 1370, Espoo, Finland, 1992. 190 p.
303. **Muhonen, A.** Evaluation of three ice-structure interaction models / A. Muhonen // A thesis for the degree of Licentiate of Technology. Helsinki University of Technology, 1995. 90 p.
304. **Nakazawa, N.** Ice forces on flat, vertical indentors pushed through floating ice sheets / N. Nakazawa, D.S. Sodhi // *Special Report 90-14*, USA. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, 1990. - 63 p.
305. **Nandan, H.** Ice induced vibration implementation of Määttänen model and development of design supplements / H. Nandan, A. H. Younan, L. Deng // *Proc. Int. Conference on Port and Arctic Engg (POAC)*. 2000. – P. 144-148.
306. **Neill, G. R.** Dynamic ice forces on piers and piles: an assessment of design guidelines in the light of recent research / G. R. Neill // *Canadian J. Civil Engineering*. 1970./ No. 3. – P. 305-341.
307. **Neill, C. R.** Dynamic ice forces on piers and piles: an assessment of design guidelines in the light of recent research / C. R. Neill // *Canadian J. Civil Engineering*. 1976. No. 3. - P. 305-341.
308. **Nevel, D. E.** Iceberg impact forces / D. E. Nevel // *Proc. IAHR Symposium on Ice*, Iowa City, USA. 1986, V. III. - P. 345-369.
309. **Nevel, D. E.** API and CSA design ice forces / D. E. Nevel // *Proc. 16th Int. Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE) and 14th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*. 1997. V. IV. - P. 443-450.
310. Nevel, D. E. Ice forces on vertical piles / D. E. Nevel, R. E. Perham, G. B. Hogue // *CRREL report*. No. 77, 1977. – 10 p.
311. Nord, T. S. Ice force identification on the Nordströmsgrund lighthouse / T. S. Nord, O. Øiseth, E. M. Lourens // *Computers and Structures*. 2016, V. 169. - P. 24–39.
312. **Nordlund, O.** Measurements of ice-induced vibrations of channel markers / O. Nordlund, T. Kärnä, E. Järvinen // *Proc. 9th IAHR Int. Symposium on Ice*, Sapporo, Japan. 1988, V. 1. - P. 537–548.
313. **Onken, G.** Ice model tests with a cylindrical structure to investigate dynamic ice structure interaction / G. Onken, K. Evers, A. Haase, P. Jochmann // *Proc. 22nd Int. Conference on Port and Ocean Engg under Arctic Conditions (POAC)*, Espoo. 2013. - P. 462-470.
314. **Palmer, A. C.** Arctic offshore engineering / A. C. Palmer, K. Croasdale. - London : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2013. - 357 p.
315. **Palmer, A. C.** A revised pressure-area curve and a fracture mechanics explanation / A. C. Palmer, J. P. Dempsey, D. M. Masterson // *Cold regions science and technology*, 2009. No. 56(2-3). - P. 73-75.
316. **Palmer, A. C.** Ice-induced vibrations and scaling / A. C. Palmer, Y. Qianjin, G. Fengwei // *Cold Region Science Technology*. 2010, No. 60. - P. 189–192.
317. **Palmer, A. C.** Fractal Crushing of Ice and Brittle Solids / A. C. Palmer, T. J. O. Sanderson // *Proc. Mathematical and Physical Sciences*. 1991. V. 433, No. 1889. - P. 469-477.
318. **Pang, S. D.** The modelling of ice-structure interaction with cohesive element method: limitations and challenges / S. D. Pang, J. Zhang, L. Poh et al. // *Proc. 23rd Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*. Trondheim. 2015. – P. 120-124.
319. **Parsons, B. L.** An estimate of the size of the damage zone beneath an indenter on ice / B. L. Parsons // *Cold Regions Science and Technology*. No. 21. 1993. - P. 371-380.

320. **Petric, C.** Growth, Structure and Properties of Sea Ice / C. Petric, H. Ficken // In book: Sea ice / Editors D. N. Thomas and G. S. Dieckmann. Chichester, U.K.; Ames, USA : Wiley-Blackwell Pub., 2010. - P. 28-73.
321. **Peyton, H. R.** Sea ice forces. Ice pressures against structures / H. R. Peyton // Technical Memorandum, 92. National Research Council of Canada. Ottawa. 1965. - P. 117–123.
322. **Peyton, H. R.** Sea Ice Strength / H. R. Peyton. Report UAG R-182, Geophysical Institute, University of Alaska, USA. 1965. - P. 135-145.
323. **Ralston T.D.** Full-thickness ice strength measurements. Proc Conference Sea Ice Forces and Mechanics. Anchorage, Alaska. 1985.
324. **Reddy, D. V.** Stochastic Response of a Three-dimensional Tower to Ice Forces / D. V. Reddy, P. S. Cheema, A. S. J. Swamidas, A. K. Haidar // Proc. 3rd Int. Symposium on Ice Problems, Hanover, USA. - P. 499-514.
325. **Reddy, D. V.** Response of offshore towers to nonstationary ice forces / D. V. Reddy, P. S. Cheema, M. Arockiasamy // In book : Stochastic Structural Mechanics. 1987. - P. 480-490.
326. **Riska, K.** Design of ice breaking ships / K. Riska // Cold regions science and marine technology. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim. 2010. - 43 p.
327. **Riska, K.** Ice edge failure process and modelling ice pressure / K. Riska // Phil. Trans. Research Society. 2018. – P. 1-28.
328. **Riska, K.** Full Scale Observations of Ship-Ice Contact / K. Riska, H. Rantala, A. Joensuu // Helsinki University of Technology, Laboratory of Naval Architecture and Marine Engineering, Report M-97, 1990. – 54 p.
329. **Saeki, H.** Ice forces on piles / H. Saeki, A. Ozaki // In: Physics and Mechanics of Ice, editor P. Tryde, Springer-Verlag. 1980. P. 342–350.
330. **Saeki, H.** Medium-scale field indentation test. MSFIT: results of 1997 winter test / H. Saeki, K. Hirayama, T. Takeuchi et al. // Proc. 8th Int. Offshore and Polar Engg Conference (ISOPE). Montreal, Canada, 1998. V. 2. P. 364–369.
331. **Sand, B.** Numerical Simulation of Level Ice Loads on Norströmsgrund Lighthouse / B. Sand, L. Fransson // Proc. Int. Conference on Cold Climate Technology, Norway, 2014. - P. 180-186.
332. **Sanderson, T. J. O.** The Ice Loads Question: Some Answers. State- of-the-Art Report. IAHR Working Group of Ice Forces / T. J. O. Sanderson // Proc. IAHR 9th Int. Symposium on Ice, Sapporo. 1986. V. 2. - P. 740-748.
333. **Sanderson, T. J. O.** Ice Mechanics - Risks to Offshore Structures / T. J. O. Sanderson. - London : Publ. Graham and Trotman, 1988. - 390 p.
334. **Schulson, E. M.** Brittle failure of ice / E. M. Schulson // J. Engineering Fracture Mechanics. 2011. – P. 211-218.
335. **Schwartz, J.** The Pressure of the Floating Ice Fields on Piles / // Proc. IAHR Int. Symposium on Ice, Reykjavik, Iceland. 1970. No. 6(3). - 12 p.
336. **Schwartz, J.** The pressure of floating ice-fields on piles / J. Schwartz // Proc. IAHR Ice Symposium, Hanover, USA. 1975. - P. 373-385.
337. **Schwartz, J.** Ice Forces affected by Temperature and Thickness of the Ice / J. Schwartz // Proc. 20th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Luleå, Sweden. 2009. – P. 1-7.
338. **Schwartz, J.** Schwarz J., ,., Petrov I.G., Hirayama K.I., Mellor M., Tryde P., Vaudrey K.D. Standardized testing methods for measuring mechanical properties of ice / J. Schwartz, R. W. Frederking, V. Gavrilov et al. IAHR section on ice problems // Cold Regions Science and Technology. 1981. No. 4. - P. 245-253.
339. **Shkhinek, K. N.** Extrusion model of crushed ice / K. N. Shkhinek, T. Karna, S. M. Kapustiansky, A. G. Jilenkov // Proc. 16th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Ottawa, Canada. 2001. - P. 1385-1394.
340. **Singh, S. K.** Tests of ice crushing on a flexible structure / S. K. Singh, G. W. Timco, R. M. Frederking, L. J. Jordaan // Proc. 9th Offshore Mechanics and Arctic Engg Conference (OMAE). Houston. 1990. V. IV. - P. 89–94.

341. **Sodhi, D. S.** Ice forces on rigid, vertical, cylindrical structures / D. S. Sodhi, C. E. Morris. Research report 84-33, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire. 1984. – 244 p.
342. **Sodhi, D. S.** Dependence of crushing specific energy of urea ice on the aspect ratio and the structure velocity / D. S. Sodhi, C. E. Morris // Proc. 16th Annual Offshore Technology Conference (OTC), Houston, USA, OTC 4688. 1984. - P. 363-374.
343. **Sodhi, D. S.** Nonsimultaneous crushing during edge indentation of freshwater ice sheets / D. S. Sodhi // Cold Region Science Technology. 1998. No. 27(3). – P. 179–195.
344. **Sodhi, D. S.** Crushing failure during ice-structure interaction / D. S. Sodhi // Engineering Fracture Mechanics. V. 68. 2001. – P. 1889-1921.
345. **Sodhi, D. S.** Characteristic frequency of force variations in continuous crushing of sheet ice against rigid cylindrical structures / D. S. Sodhi, C. E. Morris // Cold Regions Science and Technology. V. 12. 1985. - P. 1-12.
346. **Sodhi, D. S.** Energy exchanges during indentation tests in freshwater ice / D. S. Sodhi // Annals of Glaciology. 1991. V. 15. - P. 247–253.
347. **Takeuchi, T.** Ice Failure Mode and Ice Load Observed in Medium-Scale Field Ice Indentation Test / T. Takeuchi, C. Akagawa, M. Nakazawa et al. // Proc. 12th Int. Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE). Kitakyushu, Japan, 2002. - P. 607-612.
348. **Takeuchi, T.** Ice Load Equation for Level Ice Sheet / T. Takeuchi, C. Akagawa, H. Saeki et al. // Int. J. Offshore and Polar Engineering. 2002, V. 12, No. 3. - P. 171-177.
349. **Takeuchi, T.** Ice Failure Mode and Ice Load Observed in Medium-Scale Field Ice Indentation Test / T. Takeuchi, C. Akagawa, M. Nakazawa et al. // Proc. 12th Int. Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE). Kitakyushu, Japan, 2002. - P. 607-612
350. **Taylor, R. S.** Probabilistic Fracture Mechanics Applied to Compressive Ice Failure / R. S. Taylor, I. J. Jordaan // Proc. 22nd Int. Offshore and Polar Engg Conference (ISOPE). Rhodes. 2012. - P. 1235-1229.
351. **Timco, G. W.** Evaluating the ISO Arctic structures standard against full-scale empirical data // Proc. 22nd Int. Conference on Port and Ocean Engg under Arctic Conditions (POAC). Espoo, Finland. 2013. - 12 p.
352. **Timco G. W.** Overview of Historical Canadian Beaufort Sea Information / G. W. Timco, R. M. W. Frederking // Canadian Hydraulics Centre National Research Council. Report CHC-TR-057. Ottawa, Canada. 2008. - 76 p.
353. **Timco G. W.** How well can we predict ice loads? / G. W. Timco, K. R. Croasdale // Proc. IAHR 18th Int. Symposium on Ice, Sapporo, 2005. V. 1. – P. 67-174.
354. **Timco G. W.** Indentation and penetration of edge loaded freshwater ice sheets in brittle range / G. W. Timco // Proc. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium (OMAE), Tokyo. 1986. - P. 444-452.
355. **Timco G. W.** Indentation and Penetration of Edge-Loaded Freshwater Ice Sheets in the Brittle Range / G. W. Timco // J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), 1987. No. 109(3). – P. 287-292.
356. **Timco G. W.** Drop impact tests on freshwater ice: spherical head / G. W. Timco, R. M. W. Frederking // Proc. 10th IAHR Ice Symposium, Espoo, Finland, 1990. Vol. II. – P. 776-787.
357. **Timco G. W.** Laboratory impact tests on freshwater ice / G. W. Timco, R. M. W. Frederking // Cold Region Science and Technology. - Amsterdam : Elsevier Science Publishers B.V. 1993. V. 22. – P. 77-97.
358. **Timco G. W.** Timco G.W. and Johnston M.E. Caisson Structures in the Beaufort Sea 1982-1990: Characteristics, Instrumentation and Ice Loads. Tech. Report CHC-TR-003. Canadian Hydraulics Centre National Research Council of Canada. Ottawa, 2002.
359. **Timco G. W.** A review of the engineering properties of sea ice / G. W. Timco, W. F. Weeks // Cold Regions Science and Technology. 2010. V. 60. - P. 107–129.
360. **Timco G. W.** Multi-Year Ice Loads on the Molikpaq: May 12, 1986 Event / G. W. Timco, M. E. Johnston, B. D. Wright // Proc. 18th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic

Conditions (POAC). Potsdam, USA. 2005. V. 1. – P. 453-462.

361. **Timco G. W.** Time-series variations in ice crushing / G. W. Timco, I. J. Jordaan // Proc. 9th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Fairbanks, Alaska. 1987. - P. 13-20.

362. **Tryde, P.** Ice research in Denmark / P. Tryde // Symp. Krig Isfragor. Stockholm. 1974. – P. 220-228.

363. **Tsuprik, V. G.** The forming cyclic loads on the offshore structures during ice field edge fracture / V. G. Tsuprik // Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 6. – P. 118-139.

364. **Tsuprik, V. G.** Substantiations Use of the Specific Energy Ice Destruction for Calculation the Cyclic Ice Load Parameters to Sea Structures / V. G. Tsuprik // Proc. Int. Science and Techn. Conference "Earth Science", IOP Conference. V. 459. 2020. - P. 1-12.

365. **Tsuprik, V. G.** Theoretical and experimental studies of specific energy of mechanical failure of sea ice / V. G. Tsuprik // Proc. 22nd Int. Offshore and Polar Eng. Conference (ISOPE), Rhodes, Greece, 2012. - P. 1242-1245.

366. **Tsuprik, V. G.** The Method of Experimental Study of the Energy Criterion of the Sea Ice Failure Requirements to the Method and to the Criterion / V. G. Tsuprik // Proc. 23rd Int. Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE). Anchorage, USA, 2013. – P. 133-138.

367. **Tsuprik, V. G.** Study of Specific energy of mechanical destruction of ice for calculation of ice load on ships and offshore structures / V. G. Tsuprik // Proc. Int. Symposium on Marine Engineering and Technology (ISMT). Busan, Korea. 2013. – P. 166-173.

368. **Tsuprik, V. G.** The Fracture Laws of Ice Edge in its Interaction with the Support Surface of the Structure / V. G. Tsuprik // Proc. 25th Int. Offshore and Polar Engg Conference (ISOPE). Kona, USA. 2015 - P. 1803-1808.

369. **Tsuprik, V. G.** Determination the effective part of energy indenter's that spent on destruction of ice / V. G. Tsuprik // Proc. 23rd Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Trondheim, Norway, 2015. - P. 1-6.

370. **Tsuprik, V. G.** Consideration of the Mode of Contact Ice Failure in Determining Ice Forces Action on Offshore Structures / V. G. Tsuprik // Proc. 2nd Int. Offshore and Polar Engineering Conference (PACOMS). San Francisco, USA. 1992. - P. 790-794.

371. **Tsuprik, V. G.** Experimental Researching of the Specific Energy Mechanical Fracture of Ice by Method of Uniaxial Compression of Samples / V. G. Tsuprik, A. T. Bekker, E. E. Pomnikov et al. // Proc. 24rd Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), Busan, Korea. 2017. – P. 111-114.

372. **Tsuprik, V. G.** Influence of Ice Mechanical Properties on Ice-Structure Interaction Failure / V. G. Tsuprik, L. V. Kim, V. G. Zanegin // Proc. 30th Int. Symposium on the Okhotsk Sea and Sea Ice. Mombetsu, Japan. 2015. - P. 220-222.

373. **Tuhkuri, J.** Experimental observations of the brittle failure process of ice and ice-structure contact / J. Tuhkuri // Cold Regions Science and Technology. No. 23, 1995. - P. 265-278.

374. **Tuhkuri J.** Experimental investigations and computational fracture mechanics modelling of brittle ice fragmentation. DSc thesis, Acta Polytechnica Scandinavica, Mechanical Engineering Series No. 120, Helsinki. 1996. 106 p.

375. **Wang, Y. S.** Elastic-plastic stress and strain distributions in an ice sheet moving against circular structure / Y. S. Wang, J. D. Ralston // Proc. Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Espoo, Finland. 1983. - P. 940-951.

376. **Wu, T.** Simulation of Stochastic Ice Force Process of Vertical Offshore Structure Based on Spectral Model / T. Wu, W. Qiu // CMES. 2018. V. 115, No. 1. - P. 47-66.

377. **Wu, T.** A Dynamic Ice-structure Interaction Model for Prediction of Ice-induced Vibration / T. Wu, W. Qiu // Periodica Polytechnica Civil Engineering. No. 63(2). 2019. - P. 550–561.

378. **Xu, J.** Features of frequency and amplitude in ice-induced vibration of a jacket platform / J. Xu, Q. Shi, Z. Meng // Proc. Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Espoo, Finland. 1983. – P. 952-959.

379. **Xu, J.** Dynamic response of a jacket platform subjected to ice loads / J. Xu, J. L. Bernt // Proc. 6th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Quebec, Canada. 1981. V. 1. - P. 502–516.
380. **Xu, J. Z.** Ice Force Oscillator Model and Its Numerical Solutions / J. Z. Xu, L. Y. Wang // Proc. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium (OMAE). 1988. - P. 171-176.
381. **Yamashita, M.** Model test and analytical simulation of fracture mechanism ice / M. Yamashita, M. Katayama, Y. Taguchi et al. // Proc. Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). 1985. - P. 195-204.
382. **Yue, Q.** Full-scale tests of dynamic ice force in Bohai Bay / Q. Yue, X.J. Bi, F. Li, Y. Qu // Proc. 17th IAHR Int. Symposium on Ice, 2004. No. 2. - P. 139-145.
383. **Yue, Q.** Physical mechanism of ice-induced self-excited vibration / Q. Yue, Guo F. // J. Engg Mechanics. 2011. V. 138. - P. 784–790.
384. **Yue, Q.** Ice problems in Bohai sea oil exploitation / Q. Yue, L. Li // Proc. 17th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Trondheim, Norway, 2003. – P. 211-219.
385. **Yue, Q.** Ice-induced jacket structure vibrations in Bohai Sea / Q. Yue, X. Bi // J. Cold Regions Engineering, 2000, V. 14, No. 2. - P. 81–92.
386. **Yue Q.** Full-scale tests of dynamic ice force in Bohai Bay / Q. Yue, X. Bi, F. Li, Y. Qu // Proc. 17th IAHR Int. Symposium on Ice, 2004. No. 2. - P. 139-145.
387. **Zhang, D. Y.** Structural Ice-resistant Performance Evaluation of Offshore Wind Turbine Foundation / D. Y. Zhang, G. J. Wang, Q. J. Yue, C. J. Lou // Proc. 26 Int. Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece. 2016. - P. 83-90.

Лист обозначений

$p_{\max}^{\text{local}}$	– локальное давление льда на контакте с сооружением
$f(x, t)$	– удельное локальное давление льда на контакте с сооружением
p_o	– равномерно распределенное давление льда на контакте с сооружением
$p_{\max}^{\text{global}}$	– глобальное (полное) давление льда на контакте с сооружением
$p_{\max}$	– максимальное удельное давление льда на контакте с сооружением
p_{cr}	– критическое давление льда на контакте с сооружением
F	– сила давления на опору сооружения или на сооружение-монопод
F_{cr}	– контактная сила, вызывающая разрушение льда
$F_{\max}$	– максимальная сила давления на опору сооружения или на сооружение-монопод
δ_r	– относительная скорость упругого деформирования кромки льда клонения сооружения от положения равновесия
$\delta_{\text{крит}}$	– критическая деформация
v	– скорость ледяного образования
$V_{\text{ЛП}}$	– скорость дрейфа ледового поля
f_{ice}	– частота циклического разрушения льда
t	– время
D	– поперечный размер (диаметр) сооружения или опоры сооружения
$M_{\text{ЛП}}$	– масса ледового поля
$M_{\text{МЛО}}$	– масса сооружения
K	– коэффициент учета стеснения для разрушающих напряжений во льду от отношения D/h
m	– коэффициент, учитывающий форму сооружения в плане
k	– коэффициент, учитывающий плотность контакта льда с сооружением
$U_{\text{МЛО}}$	– энергия упругого отклонения сооружения от статического состояния
$U_{\text{ЛП}}$	– кинетическая энергия ледяного поля
U_{cr}^*	– критическое значение упругой энергии для деформируемого объема льда
U_{cr}	– критическое значение энергии, упруго запасенной в сжатой зоне льда на кромке ледяного поля, которое вызовет разрушения льда

ε_{cr}	– критическая плотность упругой энергии
ε_e	– плотность упругой энергии
σ_o	– прочность льда при свободном одноосном сжатии образцов
R_{ice}	– прочность (жесткость) льда на контакте с сооружением
R_{cr}	– критерий прочности льда
$\delta_{МЛО}$	– отклонения сооружения от положения равновесия
A	– площадь ледового поля
h	– толщина ровного однолетнего ледового поля
h_l	– остаточная толщина ледового поля после скалывания боковых блоков
L_{cr}	– глубина разрушения льда
W_{cr}	– напряженный объем ледяного образования
$b (B)$	– ширина опоры или сооружения
λ	– податливость (гибкость) опоры
G_s, G_i	– жесткость сооружения и льда соответственно
x, y	– текущие координаты
φ, C	– угол внутреннего трения и сцепление льда

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ. ТЕРМИНОЛОГИЯ

Граница (фронт) разрушения	- поверхность, разграничивающая массу разрушенных и неразрушенных кристаллов
Жесткость	- способность материала сохранять свои геометрические параметры в допустимых пределах при внешних воздействиях
Зона предразрушения льда	- Зона в ледяном образовании с наличием инициирующих трещин и небольших участков пластических участков
Идеально-хрупкое разрушение	- разрушение без пластических деформаций
Имитационная модель	- модель реального явления или процесса, построенная с помощью компьютерных технологий и позволяющая производить многократные имитационные эксперименты с целью получения новых знаний об исследуемом объекте.
Квазихрупкое разрушение	- разрушение, при котором пластическая зона материала тела находится в малой области вблизи вершины трещины, а вся остальная часть находится в упругом состоянии
Критерий разрушения	- классификационный признак, по которому определяется соответствие целевой функции
Самовозбуждающиеся колебания	- автоколебательное движение, вызываемое переменными силами, действующими только во время движения и зависящими от параметров самого движения
Магистральная трещина	- трещина, протяженность которой превосходит размеры структурных составляющих материалов и областей самоуравновешенных напряжений и по поверхностям которой произойдет деление образца на части
Механика разрушения	- раздел физики твёрдого тела, изучающий закономерности зарождения и роста трещин, количественные связи между свойствами материала, уровнем действующих напряжений, присутствием трещины в образце и механизмом распространения трещины
Механическое разрушение льда	- макроскопическое нарушение сплошности льда в результате контактных воздействий на него
Многоцикловая усталость	- образец выдерживает достаточно большое число циклов – 10 ⁷ и более, а когда номинальные напряжения меньше предела текучести

Модель отрицательного трения	- модель системы, когда энергия системы возрастает за счет сил «трения» из-за наличия собственного резервуара энергии
Пластическое (вязкое) разрушение	- разрушение из-за существенной пластической деформации по всему объему тела, которое сопровождается большими деформациями
Принцип ограниченного количества движения	- используется для описания взаимодействия льда с сооружением, если кинетическая энергия ледяного образования недостаточна для внедрения на глубину радиуса сооружения, то
Принцип ограниченного напряжения	- максимальная нагрузка возникает тогда, когда нормальное напряжение на поверхности сооружения достигает некоторого предела одновременно по всей площади контакта
Принцип ограниченной силы	- используется для анализа нагрузок при навале ледяного образования на сооружение, когда оно останавливается и на него передается нагрузка от следующего позади и разрушающегося более тонкого дрейфующего ледяного образования
Плотность потенциальной удельной энергии	- количество потенциальной энергии в ледяном образовании на единицу объема
Расчетная ситуация	- совокупность физических условий, представляющих период времени, в течение которого проектом предусмотрено не превышение соответствующих предельных состояний
Разрушение	- появление новых или увеличение площади старых свободных поверхностей в теле, в т.ч. необратимо разделяющих его на части
Трещина	- полость, образованная без удаления материала двумя соединенными внутри тела поверхностями, которые при отсутствии в нём напряжений удалены друг от друга на расстояния, во много раз меньше протяженности самой полости
Усталостное разрушение	- накопление необратимых микроразрушений и деформаций при циклическом (повторном) нагружении с макроскопически хрупким изломом
Удельная энергия механического разрушения льда	- работа, необходимая для образования единицы новой поверхности трещины, либо как энергия, поглощенная вновь образованной поверхностью разрушения и приходящаяся на единицу площади

Функция автоспектральной плотности	- функция спектра мощности для анализа свойств стационарных случайных процессов
Мощность глобальной ледовой силы	- физическая величина, которая показывает скорость выполнения работы глобальной ледовой силы и равна отношению работы ко времени, за которое эта работа выполняется
Энергетический критерий разрушения льда	- критерий, основанный на балансе затраченной, выделившейся и поглощенной льдом энергии
Энергия внутренняя	- часть полной энергии термодинамической системы, которая не зависит от выбора системы отсчета и которая в рамках рассматриваемой задачи может изменяться
Энергия деформации	- энергия, вносимая в тело при его деформировании. При упругом характере деформации носит потенциальный характер и создает поле напряжений. В случае пластической деформации частично диссипирует в энергию дефектов кристаллической решетки и в конечном итоге рассеивается в виде тепловой энергии.
Энергия удара	- энергия разрушения материала образца, зависящие от типа образца и условий испытания
количество энергии	- энергия разрушения материала образца, зависящие от типа образца и условий испытания
Энергетический подход	- подход, позволяющий оценить поток энергии воздействия льда на сооружение и определить параметры прочности льда
Удельная энергия разрушения	- количество поглощенной энергии, при котором у образца происходит полное исчерпание сопротивляемости внешним силам, т.е. полная потеря несущей способности

ЛЕДОВЫЕ НАГРУЗКИ. ТЕРМИНОЛОГИЯ

Глобальная (общая) ледовая нагрузка	- значение ледовой нагрузки, соответствующее рассматриваемой расчетной ситуации
Дрейф льда	- поступательное перемещение льдин в результате воздействия ветра и течения
Ледяное образование	- плавающее на поверхности воды акватории твердое тело, образованное из льда и обладающее целостностью
Ледяной покров	- любая форма ледяных образований, покрывающего в холодное время года поверхность водоема (ровный лед, наложенный лед, торосистое ледяное поле с грядами торосов, отдельные торосы и пр.)
Ледяное поле	- любой относительно плоский участок ледяного покрова более

Ледовый режим	- 20 м в поперечнике, окруженный со всех сторон водой
Ледовые условия	- устойчивая последовательность наступления и развития природных ледовых явлений и процессов, отражающая закономерный характер пространственно-временных изменений параметров и показателей ледяного покрова, обусловленных совокупным воздействием географического положения водоема, а также климатическими и гидрологическими факторами, его морфометрией
Локальное давление льда	- характерное сочетание некоторых параметров и показателей в общем комплексе составляющих ледяного покрова, позволяющее учесть степень его воздействия на технические мероприятия
Локальное давление льда	- значение ледовой нагрузки, соответствующее рассматриваемой расчетной ситуации, которое используется в критерии проектирования, применяемом к отдельному структурному элементу сооружения
Модель отрицательного трения	- значение ледовой нагрузки, соответствующее рассматриваемой расчетной ситуации, которое используется в критерии проектирования, применяемом к отдельному структурному элементу сооружения
Морской лед	- модель системы, в которой сумма всех сил вязкого трения и сопротивлений превосходит сумму всех сил сопротивлений с отрицательным возрастанием, т. е. с уменьшением сил при увеличении скорости на выходе системы
Неоднородность ледяного покрова	- любая форма льда, встречающегося в море и образовавшегося в результате замерзания морской воды
Скол льда	- фактор, учет которого при назначении проектных значений прочностных характеристик морского льда позволяет повышать точность определения нагрузок и воздействий
Смятие льда	- процесс сдвига участка льда под действием касательных напряжений
Трещина льда	- процесс последовательного хрупкого растрескивания и дробления льда под поверхностью внедряющегося жёсткого тела с последующим раздавливанием обломков, сопровождающимся разрушением кристаллической решётки материала и спрессовыванием продуктов разрушения
Трещина льда	- любой разрыв неподвижного льда, смерзшегося льда или отдельного ледяного поля, после которого наблюдается расхождение льда от нескольких сантиметров до 1 м

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ. ТЕРМИНОЛОГИЯ

Автоколебание системы	- незатухающие колебания в диссипативной нелинейной системе, поддерживаемые за счёт энергии внешних источника, параметры которых (амплитуда, частота, спектр колебаний) определяются свойствами
-----------------------	---

	самой системы и не зависят от конечного изменения начальных условий
Спектральный анализ	- Спектральный анализ - совокупность методов качественного и количественного определения состава объекта, основанная на изучении спектров взаимодействия льда с сооружением, распределения по массам и энергиям.
Феноменологический анализ	- возможность установить некоторые общие соотношения между параметрами, характеризующими рассматриваемое явление в целом

Приложение 2-1

Терминология, определения основных величин в системном анализе

В целях настоящего исследования под *Системой* понимается совокупность элементов и/или отношений, явлений закономерно связанных в единое целое, которая обладает свойствами (или, по крайней мере, одним свойством), отсутствующими у элементов и отношений его образующих (принцип интегративности¹).

Элемент – такая часть *Системы*, которая выполняет определённую специфическую функцию и (м.б. условно) не подлежит дальнейшему разбиению.

Связь (внутренняя или внешняя) – зависимость между элементами системы; перемещение и/или преобразование вещества, энергии, информации между элементами системы.

Под *Структурой Системы* понимаются *состав её элементов и постоянные связи* между ними. Характерной особенностью *структуры* вообще является *Устойчивость*. Поэтому понятие *структуры* включает в себя не все взаимодействия *элементов*, а только устойчивые во времени.

Таким образом, определение *Системы* содержит в себе два важных признака – взаимосвязь элементов и *наличие интегративного (общесистемного) свойства*.

Всякая *Система* функционирует в *среде*, рассматриваемой как совокупность объектов (процессов, явлений, предметов, параметров), воздействующих на *Систему*, но не подконтрольных ей.

Всякая *Система* имеет *входы* – элементы, функция которых состоит в восприятии воздействия среды. Вещество, энергия, информация, поступающие на вход *Системы* – *входные воздействия*, а из *Системы* в среду – *выходные воздействия*. Элементы *Системы*, реализующие выходные воздействия – *выходы Системы*.

В процессе функционирования системы входные воздействия подлежат преобразованию в выходные посредством **процессора** – средства, обеспечивающего такое

¹ Принцип проявления у **целого** свойств, не выводимых из наблюдаемых свойств его **частей**.

преобразование. В общем случае процессор представляется как единство четырёх составляющих: *оснащения, упорядоченности, катализатора и субъективного фактора*.

Оснащение – совокупность различных компонентов обслуживающих преобразование входных воздействий в выходные.

Упорядоченность – правила и последовательность преобразования входных воздействий в выходные в процессе функционирования системы.

Катализатор – совокупность компонентов различного рода, предназначенных для изменения скорости, интенсивности и качества преобразования входных воздействий в выходные.

Субъективный фактор – характеристики людей (операторов), обеспечивающих преобразование входных воздействий в выходные.

Параметром Системы является любая её характеристика, выражаемая количественно или качественно.

Совокупность всех возможных неповторяющихся параметров Системы, определённых на фиксированный момент времени «t» называется *состоянием Системы*.

Каждый из системных параметров исследуемого объекта, в соответствии с принципами системного анализа, должен быть представлен в четырёх измерениях: *статическом, динамическом, прогнозном и контрольном*.

Контрольное измерение – описание точно установленных значений (нормативных, эталонных) системных характеристик, сравнение с которыми дает оценку состояния рассматриваемой системы.

Цель Системы – конкретно определённая область в пространстве *состояний Системы*, которую она должна занимать всегда или занять за заданное или выбираемое время, «движение» к которой и достижение которой являются сутью взаимодействий *Системы* с окружающей *средой*, называемых *функцией Системы*.

Важнейшими характеристиками *Системы*² являются её *структура* и *функция*. Любая *Система* выступает как *единство функции и структуры*. Эти две характеристики *Системы* являются *системообразующими* факторами.

Функция отличается от *цели Системы*, определяемой как её определённое (желаемое) *состояние* или желаемые (искомые) количественные значения её параметров.

Функция Системы в отличие от её *цели* формулируется путём описания основного (как правило – качественного) признака всех возможных результатов взаимодействия (функционирования) *Системы* с окружающей *средой*, включая термины «преобразовать», «изменить» и т.п. Под *функционированием Системы* понимают деятельность, по преобразованию *входных воздействий* среды на Систему в *выходные воздействия* Системы на среду.

² Суть системного анализа можно сформулировать как проведение *структурного и функционального* анализов *Системы*.

Рекомендации по применению «Методологии определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на морские сооружения на основе энергетического подхода»

Образцы льда *для определения удельной энергии механического разрушения* этого материала ε_{cr} подвергаются испытаниям на свободное сжатие в лабораторных условиях при *квазидинамическом* нагружении верхней грани образца жесткой плитой испытательной машины, движущейся со скоростью соответствующей скорости движения ледовых полей в реальных условиях района, для которого проводятся исследования с высокой достоверностью получаемых данных, необходимых для проектирования транспортных гидротехнических сооружений, а также сооружений на шельфе замерзающих морей. Это достигается рядом мер и процедур.

Выбор формы и объемов образцов, подготовка их для лабораторных испытаний, отвечающих условиям реального процесса. *Образец для определения удельной энергии механического разрушения льда* испытывается на сжатия на испытательной машине с регулируемой скоростью движения подвижной жесткой плиты. Он изготавливается в виде:

1 – квадратной или прямоугольной призмы или кругового цилиндра с отношением поперечного размера их сечения к высоте не менее рекомендуемого нормативным документом максимального значения 1:2,5, а именно от 1:2,5 до 1:4,0 со снятыми кромками верхней торцевой грани в виде усеченных пирамиды или конуса на высоту не более 0,25 размера поперечного сечения (Рисунок 6.3.3-а,б);

2 – или усеченного конуса или усеченной пирамиды с высотой по п.1, с малым углом наклона образующей конуса или боковых граней пирамиды, и отношением площади опорного сечения к верхнему сечению, нагружаемому подвижной плитой от 1,25 до 1,5 (Рисунок 6.3.3-в,г);

3 – или комбинированной формы на основании цилиндра с высотой по п.1, обеспечивающий отсутствие концентрации напряжений в зоне опорной грани и верхним основанием квадратного или прямоугольного сечения размером по п.2 (Рисунок 6.3.3).

Такие форма и размеры образца, согласно проведенным тестовым экспериментам, обеспечивают устойчивый процесс механического разрушения его верхней части в виде спонтанно повторяющихся и чередующихся сколов боковых участков в зоне контакта образца с жесткой поверхностью плиты пресса, смятием в средней части его рабочего контакта и выжиманием продуктов разрушения льда из контактной зоны, что по набору видов разрушения и характеризующих их параметров аналогично параметрам реального процесса взаимодействия ЛП с опорой сооружения и что зафиксировано видеосъемкой и инструментальными записями кривой «сила-перемещение» с использованием тензометрического измерительного комплекса с записью всех параметров на персональный компьютер.

Полученные значения эффективной удельной энергии разрушения льда используются для определения двух основных физических параметров, описывающих циклическое разрушение льда:

- **максимального расчетное значение силы** контактного давления льда на опору МЛС по формуле
- и **период появления этих максимальных значений.**

Оба параметра определяются по результатам статистической обработки записанного на компьютер временного цифрового ряда $F(l) = \zeta(V;t)$ динамического разрушения сжатием больших образцов-блоков льда, отобранных в районе реализации проекта морского гидротехнического сооружения.

Максимальное расчетное значение контактной силы определяется на базе полученного из обработки испытаний средних значений контактных сил по «Правилу 3-х сигм» - к математическому ожиданию – среднему значению контактной силы необходимо прибавить 3 (или 1ж или 2 – по требованию Норм или Заказчика) значения среднеквадратического отклонения случайной величины, определенной по кривой нормального распределения. Здесь все расчеты необходимо строить с учетом Рисунка 6.4.2-б и на основании формул (6.4.3) и (6.4.4). Среднее значение контактной силы $\bar{F}_{\text{ср}}$ является математическим ожиданием максимальной вероятности значения контактной силы, как **непрерывной случайной величины**, формирующейся в зависимости от свойств льда и характера процесса его разрушения, связанного со скоростью движения

ЛП, поэтому по физической сущности оно кардинально отличается от среднестатистического значения разрушающих малые образцы льда в нормативном методе, являющееся просто числами. В формуле (6.4.3) среднее значение контактной силы $\bar{F}_{\text{ср}}$ есть **среднестатистическое значение МЕРЫ** качественного параметра *процесса совершения этой силой работы, как на пути этого процесса, так и во времени этого процесса.*

Период циклов разрушения льда – появления пиков максимальной нагрузки определяется также по результату обработки записи временного цифрового ряда разрушения образца – как «несущая частота» максимального значения спектральной плотности распределения мощности разрушения льда методом преобразования Фурье цифрового ряда записи процесса разрушения образца льда

Таким образом, предлагаемая форма и размеры образца позволяют определять удельную энергию механического разрушения льда $\varepsilon_{\text{ср}}$ при скорости его нагружения соответствующей скорости дрейфа ЛП и в условиях реализации *многоциклового разрушения* части образца льда, как удельные *интегральные затраты* энергии на работу *сдвиговых и сжимающих деформаций*, так и на работу, расходуемую на *выжимание продуктов разрушения* льда из зоны контакта.

Но наиболее важным наблюдением, которое вытекает из результатов исследований прямого измерения силы на реальных сооружениях, описанных в [Ошибка! Закладка не определена.], является вывод о том, что *можно пренебречь эффектом влияния на изменения параметров возбуждающей колебания сооружения силы*, если скорость льда имеет значения от умеренной до высокой и при незначимом по сравнению с толщиной льда значении отклонения сооружения от действия этой силы. Многие оффшорные структуры работают в таких условиях.

СОПРОВОДИТЕЛЬНЫЕ ДОКУМЕНТЫ А. Патенты

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2640452

**Способ определения удельной энергии механического
разрушения льда**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Дальневосточный федеральный университет" (ДВФУ)
(RU)*

Автор: *Цуприк Владимир Григорьевич (RU)*

Заявка № 2016144093

Приоритет изобретения 10 ноября 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 09 января 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 10 ноября 2036 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Изrael

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 170013

Образец для испытания материала на осевое сжатие

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДВФУ) (RU)*

Автор: *Цуприк Владимир Григорьевич (RU)*

Заявка № 2016144090

Приоритет полезной модели 10 ноября 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 11 апреля 2017 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 10 ноября 2026 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 170014

Образец для испытания материала на осевое сжатие

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДВФУ) (RU)*

Автор: *Цуприк Владимир Григорьевич (RU)*

Заявка № 2016144092

Приоритет полезной модели 10 ноября 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 11 апреля 2017 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 10 ноября 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 170014

Образец для испытания материала на осевое сжатие

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДВФУ) (RU)*

Автор: *Цуприк Владимир Григорьевич (RU)*

Заявка № 2016144092

Приоритет полезной модели 10 ноября 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 11 апреля 2017 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 10 ноября 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



Б. Участие в разработке главы СНиП II-57-82 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)

*Директору
6.08.82.*

Директору ВНИИГа
имени Б.Е. Веденеева
тов. Складневу М.Ф.

45-2615 05.07.82

О согласовании технического
задания на разработку СНиПа

Направляю лист согласования Технического задания на разработку дополнения к главе СНиП 57-82 "Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)".

Дальневосточный ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт им. В.В. Куйбышева (ДВПИ) Минвуза СССР, кафедра гидротехники согласны с текстом технического задания на разработку дополнений к главе СНиП II-57-82 "Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые, от судов)", составленного ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева.

Кафедра гидротехники ДВПИ им. В.В. Куйбышева совместно с ААНИИ, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, МИСИ им. В.В. Куйбышева в десятой пятилетке была соисполнителем по госбюджетной проблеме, утвержденной ГК НТ Совета Министров СССР (СЭВ) № 0.74.01.06.08 Н II, "Разработать методы расчета характеристик льдов для проектирования и строительства гидротехнических сооружений в шельфовых зонах морей СССР (ответственные исполнители доц., к.т.н. Н.Г. Храпачев, с.н.с., к.т.н. В.Г. Цуприк, 1975-1980 гг.).

В настоящее время кафедра гидротехники ДВПИ им. В.В. Куйбышева является исполнителем совместно с ДПИ им. М.И. Калинина, МИСИ им. В.В. Куйбышева по темам 01.03 Н1В "Исследование ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения нефтегазопромыслов и создание искусственных ледостойких островов (срок окончания 1985 г.) и 01.03 Н1ВЗ "Исследование общей устойчивости и прочности конструкций стационарных сооружений" (срок окончания 1983 г.). Эти темы выполняются согласно программе по решению проблемы С.Ц.007 "Создание и внедрение технологических процессов и технических средств для поиска, разведки и промышленного освоения нефтяных и газовых месторождений континентального шельфа СССР", выполняемому Мингазпромом СССР, Минсудпромом СССР,

минвузом СССР, Академией наук (см. приказ минвуза СССР № 1171 от 8 декабря 1981 г.). Научным руководителем этих тем в ДВПИ им. В.В. Куйбышева назначен заведующий кафедрой "Гидротехники" доцент Н.Г. Храпатый.

Кроме того на кафедре "Гидротехники" выполняется хоздоговор по заказу объединения "Сахалинморгазнефтепром" на тему "Разработка методики расчета и конструирования морских гидротехнических сооружений на шельфе о. Сахалин", окончание которых намечено в 1985 г.

Руководитель организации-соисполнителя,

ректор института, профессор



Б.Ф. Титаев

"__" _____ 1982 г.

ДВНН

Лаборатория детерминки

ПРОТОКОЛ
рабочего совещания по разработке
дополнений
к главе 6 СНиП-П-77-82

от 19.01.83 г.

1. Присутствовали представители головной организации, организаций-соисполнителей и проектных организаций:

1. ВНИИГ им. Г.Е. Яценеева - 3 чел.
2. ЛПИ им. И.И. Калинина - 1 чел.
3. ДПИ им. Куйбышева - 2 чел.
4. ИО-И - 2 чел.
5. ЛПИИТ - 1 чел.
6. ЛПИИТ - 1 чел.
7. ЦТО им. А.А. Яковлева - 2 чел.
8. ГТИ - 1 чел.
9. ЧерцНИС - 2 чел.
10. Донгипротранс - 1 чел.
11. Белгипродор - 1 чел.

2. заслушали сообщение руководителя работ по разделу 6 СНиП-П-77-82 г.г.г. Г.Е. Яценеева.

3. ПОСТАНОВИЛИ:

а. Поручить работы по разделу 6 СНиП-П-77-82 следующим организациям и исполнителям:

Содержание работ, пунктов СНиП	Организация	Исполнители
1	2	3
Прочностные характеристики льда пп. 6.1; 6.2	ВНИИГ	Наталина Л.Н. Гладков Л.Г. Соренчиков В.А.
	ВНИПИ	Игровев В.А. Коршунин С.А.
	МАСИ	Юнайтгородский Е.А.
	ДПИ	Храпатын Л.Г. Кузнецов Л.Г.
	ИО-И	Лейсин Л.Л.
	ГТИ	Донченко В.В.

1	2	3
Нагрузки от ледяных полей на сооружения пп. 6.3 - 6.6	МНИИ НИИИ ИСИ ЛПИ ДПИ ИСИ ЦИИС	Алеников С. П. Шелева Л. А. Ирзоев А. Зершин С. А. Копалгородский Е. М. Долгополов Л. Л. Храпак Л. Г. Цуприк Л. Г. Хейсин Л. Л. Касхачих Г. Л.
Нагрузки и воздействия на сооружения от сплошного ледяного покрова при его температурном расширении пп. 6.7-6.8	МНИИ ЦИИС Черныш	Разгоровская Л. Л. Бегус Р. А. Касхачих Г. Л. Гречинев Л. Л.
Нагрузки на сооружения от зачехных и заторных масс льда пп. 6.9 - 6.11	МНИИ ГТ	Дорогов Л. Л. Дроздов Л. Л. Беренцов Л. Л. Долгопо Р. Л.
Нагрузки от примерзшего к сооружению ледяного покрова при изменении уровня воды пп. 6.12 - 6.14	МНИИ ИСИ МНИИ ИСИ	Маталова Л. Л. Копалгородский Е. М. Ситкин Л. Л. Хейсин Л. Л.
Климатические параметры ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения пп. 6.1; 6.6; 6.7	ГГО	Кобелева Л. Л.
Рекомендации по методике определений прочностных характеристик льда п. 6.1	МНИИ ГПИ	Маталова Л. Л. Гладков Л. Л. Кореньков В. А. Цуприк Л. Г.

- 3 -

2. Материалы первой редакции переслать в головную организацию / ИНИИГ / до 30.04.83 г.

3. Разработать совместно с привлеченными организациями-соисполнителями / ИПИ, ЛСН, ГГО, ГТИ / технические задания до 01.02.83 г.

4. Материалы первой редакции рассмотреть в июне текущего года на координационном совещании в г. Урманске и на техническом совещании в г. Яку.

Председатель,
руководитель лаборатории
ледотермики

В. П. Янин

В. П. Янин

Секретарь

И. Ч. Чернова

В. Акты внедрения



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И
НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Дальневосточный федеральный
университет»
(ДВФУ)**

Инженерная школа

ул. Пушкинская, 10, г. Владивосток, 690950
Тел.: (423) 226-02-41 Факс: (423) 226-69-88
Эл. почта: director@technology.dvfu.ru
<http://www.dvfu.ru>
ОКПО 02067942, ОГРН 1022501297785
ИНН/КПП 2536014538/253601001

В диссертационный

совет при

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»

**195220, С.-Петербург,
ул. Гжатская, 21**

№ _____ от 11.09.2014 г.

С П Р А В К А

Выдана к.т.н., доценту Цуприку Владимиру Григорьевичу, заместителю директора ИШ в том, что результаты исследований, выполненных в его диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «Методология определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на морские сооружения на основе энергетического подхода» в части методики экспериментального определения динамической прочности (твердости) морского льда были включены в ч.1 окончательного Отчета о составной части опытно – конструкторской работы «Разработка рекомендаций и РКД по конструированию и нормированию прочности ледового пояса перспективных инженерных сооружений, работающих на арктическом шельфе, типовых конструкций ледовой защиты райзеров плавучих буровых установок, обеспечивающей их высокую надежность и малую материалоемкость» по Федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники» на 2009-2016 годы, утвержденная постановлением Правительства РФ от 21.02.2008 г. № 103 по теме: «Проведение аналитических исследований в обеспечение разработки

технических решений» (Шифр «Платформы-лед-конструкция»; уникальный номер закупки 018/09-РГМТ-27.12ок).

Заместитель директора

Инженерной школы по НИР,

д.т.н., профессор

В.И. Петухов

Руководитель темы,

д.т.н., профессор,

чл.-корр. РААСН

А.Т. Беккер





Общество с ограниченной
ответственностью
**«НАУЧНО-
ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ОБЪЕДИНЕНИЕ «ГИДРОТЕКС»**
(ООО «НПО «Гидротекс»)

пр. Красного Знамени, д. 66, Владивосток, 690014
Тел.: (423) 236-62-33. Факс: (423) 240-82-83
E-mail: gtsc@gtsc.ru, sec1@gtsc.ru
ОКПО 55295784, ОГРН 1032501279315
ИНН/КПП 2536104460/253601001

В Диссертационный Совет
АО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева

195220, С.-Петербург,
Гжатская ул. 21

№ _____

СПРАВКА

Настоящая справка дана доценту Инженерной школы Дальневосточного федерального университета к.т.н. Цуприку Владимиру Григорьевичу в том, что результаты исследований, выполненных в его диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «Методология определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на морские сооружения на основе энергетического подхода» были применены в отчете «Ice abrasion test» (документ №RUSD-HYY-J2-BR-37000) по результатам выполненных по заказу №RUSD-AEP-J2-KZ-SE116-0001 компании «Aker Solutions LTD» проектно – изыскательских работ в рамках проекта «Sakhalin-1 Arkutun - Dagı GBS Project» *в части получения экспериментальных значений динамической прочности морского льда для использования в методике расчета проектной глубины ледовой абразии бетонных поверхностей опорных конструкций морского ледостойкого основания буровой платформы БЕРКУТ.*

Методика расчета проектной глубины ледовой абразии бетона опор МЛО, разработанная творческим коллективом в составе: д.т.н., профессор Беккер А.Т. (руководитель), к.т.н., доцент Уварова Т.Э.; к.т.н., доцент Ким Л.В., аспирант Прутков И.Г., аспирант Анохин П.Г., магистрат Помников Е.Е. была реализована с использованием результатов экспериментального определения динамической прочности (твердости) морского льда по методике Цуприка В.Г. Результаты всего этого комплекса работ вошли в отчет «Ice abrasion test». На основе полученных результатов были разработаны рекомендации по проектированию ледозащитных поясов оснований буровых гравитационных платформ типа «Condeer» для Сахалинского шельфа.

Коммерческий директор



В.И. Селиверстов



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И
НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Дальневосточный федеральный
университет»
(ДВФУ)

Инженерная школа
ул. Пушкинская, 10, г. Владивосток, 690950
Тел.: (423) 226-02-41 Факс: (423) 226-69-88
Эл. почта: director@technology.dvfu.ru
http://www.dvfu.ru
ОКПО 02067942, ОГРН 1022501297785
ИНН/КПП 2536014538/253601001

В диссертационный совет
АО «ВНИИГ
им. Б.Е. Веденеева»

№ б/н

от 15/02/2015

Акт о внедрении результатов научных исследований

Выдан к.т.н., доц. Цуприку Владимиру Григорьевичу, к.т.н., профессору кафедры Механики и математического моделирования, заместителю директора ИШ по УВР в том, что результаты исследований, выполненных им в его диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по разработке методологии экспериментального определения параметров ледовой нагрузки на шельфовые сооружения от морского льда, были включены в промежуточный Отчет (Инв. № 31/03D-368-2014 Б) за 2014 г. на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России этап 1: «Анализ влияния региональных факторов на конструктивный облик судов и морских инженерных сооружений, нормативы качества морской среды», задание № 2014/36.

Заместитель директора
Инженерной школы по НИР,
д.т.н., профессор

Заведующий кафедрой Гидротехники
теории зданий и сооружений, к.т.н., доцент

Руководитель темы,
к.т.н., доцент

В.И. Петухов

Н.Я. Цимбельман

Л.В. Ким





Общество с ограниченной
ответственностью
**«НАУЧНО-
ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ОБЪЕДИНЕНИЕ «ГИДРОТЕКС»**
(ООО «НПО «Гидротекс»)

пр. Красного Знамени, д. 66, Владивосток, 690014
Тел.: (423) 236-62-33. Факс: (423) 240-82-83
E-mail: gtsc@gtsc.ru, sec1@gtsc.ru
ОКПО 55295784, ОГРН 1032501279315
ИНН/КПП 2536104460/253601001

В диссертационный
совет на базе
АО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева

195220, С.-Петербург, Гжатская ул. 21

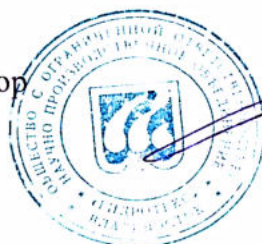
№ _____

СПРАВКА

Настоящая справка дана к.т.н., доценту Инженерной школы Дальневосточного федерального университета к.т.н. Цуприку Владимиру Григорьевичу в том, что результаты исследований, выполненных в его диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «Методология определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на морские сооружения на основе энергетического подхода» были применены при изысканиях ледовых условий для проектирования конструкции грузопассажирского пирса по проекту «Научно-образовательный комплекс «Приморский океанариум» в г. Владивосток о. Русский, п/в Житкова. I очередь строительства». Грузопассажирский пирс», выполнявшемуся ООО НПО «ГИДРОТЕКС» по Договору от 16.06.2009 г. № 58/09 с ОАО «Приморгражданпроект».

В проекте, на этапе предварительных полевых изысканий в районе проектирования у п/ва Житкова в г. Владивостоке на о. Русский, была использована экспресс – методология Цуприка В.Г. для получения динамической прочности морского льда, позволившая не только получить дополнительный экономический эффект, но и сократить объемы и сроки проведения работ и получить надежный критерий для определения расчетных параметров ледовой нагрузки на опоры проектируемого пирса.

Генеральный директор



А.Т. Беккер