

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Владивосток – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ)

Научный консультант: **Беккер Александр Тевьевич**, д.т.н., профессор, действительный член РААСН, Заслуженный работник высшей школы РФ, научный руководитель Политехнического института (Школы) ДВФУ, руководитель департамента «Морские арктические технологии»

Официальные оппоненты:

Сазонов Кирилл Евгеньевич, д.т.н., профессор, начальник лаборатории «Морской ледотехники» «Крыловского государственного научного центра» (ФГУП «КГНЦ»), член Национального комитета по теоретической и прикладной механике

Смирнов Виктор Николаевич, д.ф.-м.н., Лаборатория физики льда Федерального государственного бюджетного учреждения «Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт» (ФГБУ «ААНИИ»).

Трусков Павел Анатольевич, д.т.н., начальник отдела по взаимодействию с государственными органами надзора и контроля Сахалин Энерджи Инвестмент Компании, Лтд.

Ведущая организация: **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**

Защита состоится 28 июня 2022 г. в 10:00 (по местному времени) на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.187.02 на базе АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева», Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21.

E-mail: ivanovatv@vniig.ru, тел. +7 (812) 493-93-63.

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

Автореферат разослан

« ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук

Т.В. Иванова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Россия в целях решения важнейших хозяйственно–экономических задач, определяющих не только развитие топливно–энергетического комплекса, но и отраслей переработки нефти и природного газа, подошла к необходимости **интенсивного освоения ресурсов шельфа ледовитых морей**. Поэтому увеличение масштабов освоения месторождений нефти и газа на морских акваториях с тяжелым ледовым режимом является **стратегической задачей РФ**, решение которой требует серьезного **научного сопровождения**.

Актуальность темы исследования. Имеющиеся в современной мировой практике примеры угроз разрушения отдельно стоящих морских гидротехнических сооружений (МГТС) и примеры реально разрушенных сооружений на Балтике, на Каспийском и Азовском морях, в Бохайском заливе говорят о несовершенстве существующих методов их проектирования, что свидетельствует о наличии **серьезной проблемы**, связанной с **возникновением явления вибрации (колебаний) оснований** отдельно стоящих гидротехнических сооружений вертикального типа, подверженных циклическим нагрузкам от дрейфующих ледовых полей (ЛП). Вынужденные колебания морских ледостойких сооружений (МЛС) или вибрации их отдельных элементов является опасным явлением, так как они могут привести не только к таким негативным эффектам как: усталостное разрушение материала конструкций; разжижение грунтов в основании сооружения и его сдвиг по дну; нарушение нормальной работы оборудования и персонала, но к появлению **резонанса в системе ЛП – МЛС**, резко ускоряющего и усиливающего эти эффекты.

Сущность феномена вибрации МЛС заключается в **механизме периодического контактного разрушения** льда в процессе взаимодействия ЛП с МЛС: сила давления ледового поля **на опорные элементы конструкции и отклоняющая** основание платформы от вертикального положения **одновременно** создает критическое напряженно–деформированное состояние упругого сжатия локального объема льда в зоне контакта, вызывая его **локальное разрушение**, чем генерирует колебательный процесс в системе ЛП – МЛС при резком **сбросе давления льда**, вызывающем возвращение МЛС в начальное положение, навстречу движущемуся на него ЛП, которое снова многократно отклоняет МЛС.

Очевидно, что как **к проектированию, так и к строительству** таких уникальных гидротехнических сооружений как МЛС, имеющих колоссальную стоимость и трудоемкость их создания, должны предъявляться самые **жесткие требования по их надёжности**, что требует совершенствования ее расчетов в системной методологии их проектирования путем **дополнения нормативных документов** или **разработки новых**. Поэтому, 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 надёжности и безопасности**.

Объект исследования в данной проблеме – это **механизм циклического разрушения льда**, формирующий **циклическую ледовую нагрузку** и обеспечивающий **порционное и одновременное** расходование кинетической энергии ЛП с равнозначными ее затратами на

разрушение льда и на упругое отклонение МЛС в процессе их взаимодействия.

Предметом исследования в процессе разрушения льда, как в механизме «отбора энергии» ЛП, является его основной элемент – *регулирующий количество энергии*, поглощаемой на процессы разрушения льда в одном цикле нагрузки упруго сжатого локального объема льда – *эффективная удельная плотность энергии упругого деформирования льда* – ϵ_{cr} , являющаяся *естественным энергетическим критерием разрушения льда*.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время *нет теоретически и экспериментально обоснованного решения задачи по определению параметров цикличности разрушения льда* при его воздействии на опоры гидротехнических сооружений. В нормативных документах всех стран, регламентирующих правила определения ледовой нагрузки на сооружения, до 2010 г. применялась единая *«статическая» расчетная модель ледовой нагрузки* на гидротехнические сооружения – «модель Коржавина К.Н.», основанная на гипотезе российских исследователей начала 20 века о *равномерном распределении давления на контакте* сооружения со льдом, который в данной модели рассматривается как континуальная среда.

Эта «традиционная» методология утверждалась в СССР в качестве нормативной начиная с ГОСТ 3440-46, дорабатывалась, совершенствовалась и без изменения ее сути продолжает работать в СП 38.13330.2018. В 1988 году Т.Ю. Sanderson построил единую зависимость давления льда на сооружение от площади контакта (*«Концепция Р-А»: Давление – площадь контакта*), которая в 2010 г. стала основой стандартов *ISO 19906* и ГОСТ Р ИСО 19906 «Сооружения арктического шельфа». Методология этого стандарта базируется на *подтвержденной экспериментально – статистической гипотезе о «зонах высокого давления»*, т.е. о *стохастическом распределении давления льда* во времени и по номинальной площади контакта.

Построения действующих *нормативных моделей* изначально *не предусматривали учета времени процесса* взаимодействия дрейфующих ледовых образований с опорами оснований сооружений в модели расчета нагрузки от льда, т.е. существующие нормативные модели – статические и детерминированные, выдают результат расчета в виде силы статического контактного давления льда на опору. Согласно формальным математическим формулам, записанным в нормативных документах, условием обеспечения устойчивости отдельно стоящего МЛС при воздействии ЛП, имеющего способный его разрушить запас *кинетической энергии*, является условие *непрерывно протекающего процесса локального разрушения льда* в месте контакта кромки ЛП с поверхностями опор МЛС как результат работы *постоянной по значению контактной силы* на пути прорезания льда опорой МЛС. Это *не соответствует* параметрам реального процесса взаимодействия ЛП с МЛС, так как эти модели никак *не описывают физические прерывания процесса* взаимодействия актами разрушения льда в массиве контактной зоны ЛП, а также и наличие *пиков нагрузки и ее сбросов*.

Таким образом, действующие нормативные документы, основанные на **силовом подходе**, не содержат **методологию определения параметров циклического разрушения льда**, что в принципе не может обеспечить достижение гарантированной надежности расчетов конструкций МЛС на динамические ледовые нагрузки в соответствии с требованиями Межгосударственного стандарта «**Надежность строительных конструкций и оснований**» (ГОСТ 27751-2014) – основополагающего нормативного документа, регламентирующего методологию обеспечения надежности сооружений. Согласно его требованиям, расчетная схема включает в себя: «расчетные модели нагрузок и воздействий; расчетные модели, описывающие напряженно-деформированное состояние элементов конструкций и оснований; расчетные модели сопротивления». Вышеуказанный ГОСТ требует при динамическом расчете сооружения иметь «закон изменения нагрузки во времени или частоты ... или спектральные характеристики (энергетический спектр)».

Цель исследования – создание прогрессивной **расчетно – экспериментальной методологии определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на морское гидротехническое сооружение, основанной на фундаментальных законах сохранения и обеспечивающей получение адекватных реальному процессу разрушения льда характеристик циклической ледовой нагрузки** от дрейфующих ледовых полей на морское ледостойкое гидротехническое сооружение.

Для достижения **поставленной цели** и, следуя требованиям **нормативной методологии** расчетов надежности испытывающих динамические нагрузки строительных конструкций (ГОСТ 27751-2014), в работе поставлены **следующие комплексные задачи**:

1. Выполнить **анализ методологической основы** 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 МЛС, а также анализ результатов экспериментально-теоретических исследований в области выбора **расчетных моделей ледовых нагрузок и критериев разрушения льда**, обеспечивших обоснование Норм;

2. Выполнить комплекс процедур системного анализа совокупности взаимодействующих объектов ЛП и МЛС с целью определения **роли и места механизма разрушения льда**, как объекта исследования в функционирующей системе «ЛП – МЛС», в формировании **расчетной модели** циклической ледовой нагрузки на МЛС;

3. Разработать **имитационную модель** механизма разрушения морского льда на контакте ЛП с МЛС с учетом строения морского льда, его физико-механических параметров, влияния на процесс его контактного разрушения факторов внешней среды и параметров задачи и выполнить ее прямые и косвенные верификации методами численного и физического моделирования, произвести сопоставление с моделями других авторов;

4. Выполнить теоретические и экспериментальные исследования критерия разрушения морского льда, как природного материала со сложной реологией, с использова-

нием энергетической концепции разрушения и *разработать адекватный метод* экспериментального определения физических значений этого критерия с использованием математического и физического моделирования с последующим применением этой характеристики в разработанной расчетной модели разрушения льда, произвести прямую и косвенные *верификации* экспериментальных значений критерия разрушения льда;

5. Разработать *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, а именно его порогового для запуска процесса разрушения льда значения, регулирующего длительность циклов разрушения льда. Выполнить *верификацию методик* по данным модельных и натурных экспериментов по прорезанию ЛП моделями МЛС;

6. Разработать *рекомендации по применению новой методологии* определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на морское гидротехническое сооружение: максимальных значений контактной силы и ее частоты для динамического расчета морских ледостойких сооружений.

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.

Научная новизна состоит в следующих результатах работы:

– впервые, по результатам анализа энергетического обмена в системе «ЛП – МЛС» в качестве *интегрального критерия разрушения льда* предложена к применению в расчетах параметров циклической ледовой нагрузки *эффективная плотность удельной упругой энергии \mathcal{E}^** , связанная с особенностями реологических свойств морского льда; *иницирующая начало цикла его разрушения и регулирующая длительность этого цикла*, определяющую период ледовой нагрузки на сооружение;

– впервые, по результатам экспериментальных исследований удельной энергии механического разрушения обладающего *сложной реологией* морского льда \mathcal{E}_{cr} , предложена *универсальная математическая феноменологическая энергетическая модель* описания *комплексного явления* его послойного разрушения, описывающая сразу несколько одновременно и стохастически развивающихся в одном акте разрушения льда процессов различных типов его деформирования критическим значением одного *универсального интегрального энергетического критерия разрушения* – плотности эффективной удельной энергии механического разрушения льда – \mathcal{E}^* .

– впервые для определения \mathcal{E}^* предложен способ испытаний больших образцов

различной формы *на динамическое сжатие*, показана инвариантность этой характеристики к условиям испытаний, высокая повторяемость результатов ее определения, 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 МЛС с использованием *эффективной плотности удельной упругой энергии \mathcal{E}^* морского льда – критерия его разрушения*.

Теоретическую значимость диссертационного исследования имеет математическая модель *описания сложного* по набору одновременно протекающих и разных по природе типов стохастически развивающихся процессов в одном комплексном акте разрушения напряженного объема морского льда *единым интегральным энергетическим критерием его разрушения* – плотностью эффективной удельной энергии механического разрушения льда – \mathcal{E}_{cr} .

Практическая значимость исследования состоит в *прикладных аспектах полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований механизма разрушения морского льда* для расчетно-проектной практики, а именно в возможности выполнения расчетов **динамических параметров цикличности ледовой нагрузки** по новой, комплексной, физически обоснованной методологии, обеспечивающей повышение надежности результатов расчетов ледовой нагрузки на МЛС, 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 – \mathcal{E}^* для использования в программно-расчетных комплексах для обоснования форм и размеров ледостойких МЛС, расчетов их надежности;

2. В применении для расчетов параметров цикличности динамической ледовой нагрузки на МЛС методик экспериментального определения эффективных значений \mathcal{E}_{cr} , как энергетического критерия динамической прочности с использованием больших образцов или блоков льда;

3. В разработке и верификации моделей контактных взаимодействий ЛП с МЛС для реальных проектов их возведения в условиях конкретного региона с учетом реальных значений энергетического параметра его прочности \mathcal{E}_{cr} , получаемого в результате опытов с образцами или большими блоками льда, его массивом в торцевой части ЛП.

Автор участвовал в исследованиях по корректировке главы СНиП II-57-75 "Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)" и разработке ее новой редакции СНиП 2.06.04-82 в 1973-76 гг., проводившихся рядом организаций, согласно Техническому заданию координатора проекта ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Материалы исследований диссертанта в 1976-82 гг. вошли в отчеты о НИР №78009129, Разработка методов расчета характеристик льдов для проектирования и строительства гидротехниче-

ских сооружений в шельфовых зонах морей СССР. Отдельные методики работы применялись в обеспечении проектно-изыскательских работ по заказам проектных организаций, что обозначено в актах и справках о внедрении результатов работы.

На защиту выносятся следующие основные результаты работы:

Комплекс моделей, методов и способов, представляющих в совокупности *методологию получения расчетных параметров цикличности ледовой нагрузки*:

1 Энергетический **критерий** динамической прочности льда – *плотность эффективной удельной энергии его механического разрушения \mathcal{E}_{cr}* , как интегральный параметр динамической прочности льда в зоне его взаимодействия с жесткими преградами;

2 Универсальная математическая феноменологическая энергетическая **модель описания сложного** комплексного явления одновременно протекающих и стохастически развивающихся в слое сжатого льда процессов различных типов его деформирования в одном акте разрушения его напряженного слоя *единым интегральным энергетическим критерием разрушения морского льда* – плотностью эффективной удельной энергии механического разрушения льда – \mathcal{E}^* ;

3 **Метод** определения значений эффективной удельной энергии механического разрушения льда \mathcal{E}^* способом испытания больших образцов динамическим сжатием, защищенный патентом РФ, и, также защищенные патентом формы и соотношения размеров образцов льда для его испытания сжатием в целях определения удельной энергии механического разрушения морского льда \mathcal{E}_{cr} ;

4 **Методика** определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на МЛС (расчетной частоты и максимального значения контактной силы разрушения льда) при динамических испытаниях больших образцов сжатием или прорезании ледового поля сооружением или моделью;

5 **Метод** верификации расчетных параметров цикла динамической ледовой нагрузки, получаемых в испытаниях больших образцов, сравнением с параметрами цикличности разрушения льда при прорезаниями ледового покрова моделями опор.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается корректным использованием методологических принципов системного подхода, математических и физических методов, в частности *фундаментальных законов физики и обоснованной модификации известных 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 собственных численных и экспериментальных исследований с данными других авторов.

Личный вклад автора. Автором выделена актуальная проблемная ситуация в важной отрасли экономики сформулированы тема и цель работы, объект, предмет, задачи, общая методология диссертационного исследования на основе системного анализа и энергетического подхода к описанию динамического процесса взаимодействия ЛП с

МЛС; разработаны модели разрушения льда, выявлен и описан энергетический интегральный критерий динамической прочности морского льда; выполнены прямые косвенные и дублирующая верификации моделей разрушения льда численным и физическими экспериментами.

Автор руководил или участвовал в разработке, планировании и проведении всех видов экспериментов; их обеспечения, планирования, в обработке экспериментальных данных, анализе и интерпретации их результатов, в апробации результатов экспериментов в математических моделях. Автором лично разработан, запатентован и реализован метод определения энергетического критерия разрушения льда динамическими испытаниями на сжатие больших образцов, формы и размеры которых им также запатентованы; лично им выполнена оцифровка и статистическая обработка цифровых рядов записей процессов разрушения образцов и прорезания моделями ледового покрова для выполнения прямой верификации методики определения расчетной частоты пиков ледовой нагрузки путем *сравнения частотных спектров мощности*.

Также автором разработаны методика экспериментального определения параметров циклической ледовой нагрузки на МЛС путем обработки цифровых рядов записей процессов разрушения льда в лабораторных и полевых экспериментах и рекомендации по ее применению; автор лично написал все его публикации и непосредственно участвовал в подготовке нескольких работ, опубликованных по теме выполненного исследования в соавторстве.

Апробация работы. Основные положения исследований более 35 раз докладывались и обсуждались на всесоюзных, всероссийских и международных конференциях, в том числе на: Международном научном симпозиуме «Физические методы исследования снега и льда». Ленинград, ААНИИ, 1973; на научном симпозиуме "Физико-технические проблемы морского льда" (ГУ ГМС, ААНИИ, АН СССР, Ленинград, 1976); на I и IV 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, Luleå -1978, Владивосток -2018; на Всесоюзных конференциях по механике и физике льда (Институт Проблем механики АН СССР, Москва) - 1981, 1983; на International conference on Ice Technogy., Cambridge – 1986; на Int. Offshore and Polar Eng.Conf., ISOPE: San Francisco – 1992, Rhodes – 2012, Anchorage – 2013, Bussan – 2014, Kona – 2015, Rhodes – 2016, San Francisco – 2017; на ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium (PACOMS): Владивосток 2012, Чеджу 2018; на Int. Geotechnical Symp. Okhotsk Sea & Sea ice, Mombetsu, 2012, 2014, 2015; на Intern. Symp. on Marine Engineering and Technology (ISMTE), Bussan – 2013; на Int. Geotechnical Symp. on Geotechnical Engineering, Incheon, 2013; на I – V всероссийских конференциях «Полярная механика», Новосибирск 2012, 2018; Санкт-Петербург 2014, 2017; Владивосток 2016; Int. Conf. POAC: Trondheim –2015, Bussan –

2017; на Всероссийской НТК «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии», Санкт-Петербург – 2015; на Международной НТК «Фундаментальные исследования океанотехники и морской инфраструктуры...»: Комсомольск-на-Амуре – 2015; на Научно-практической конф. RAO/CIS Offshore, Санкт-Петербург, 2017; на Int. Science and Techn. Conf. "EarthScience" (IOP Conf.) 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 базами Scopus, Web of Science; 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 глав, Заключения, Списка источников и Приложений. Она содержит 394 страницы, включая 172 рисунка; 14 таблиц; список литературы из 387 источников на 20 страницах, в т.ч. 230 публикаций иностранных авторов и 4 приложения на 25 страницах. Приложения содержат термины, условные обозначения и копии документов, подтверждающих внедрение и практическое использование результатов работы.

Материалы данного исследования в течение многих лет используются в учебном процессе при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов по профилям «Гидротехнические сооружения», «Прикладная механика и математическое моделирование» направлений подготовки «Строительство» и «Прикладная механика», а также по специальности «Строительство уникальных зданий и сооружений», при проведении занятий по курсам: «Морские шельфовые сооружения», «Нагрузки на гидротехнические сооружения», «Механика разрушения», «Механика контактного взаимодействия и разрушения материалов».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показано, что в государственных программах обозначено, что их реализация по увеличению добычи нефти и газа в существенных объемах будет осуществляться на акваториях Баренцева, Печорского, Карского, Охотского и Восточно-Сибирского морей, покрываемых сезонным льдом. В первую очередь, в рамках комплексного освоения территорий по типу проектов "Сахалин" и «Приразломное» с использованием буровой платформы, сооружений по отгрузке нефти, конденсата и СПГ на экспорт («отгрузочные буи»). Здесь *обозначена проблема*, связанная с возникновением вибрации (колебаний) отдельно стоящих морских гидротехнических сооружений, подверженных нагрузкам на их опоры от циклического разрушения льда в процессе воздействия на них дрейфующих ледовых образований, чаще – ледовых полей (ЛП) (рисунок В.1).

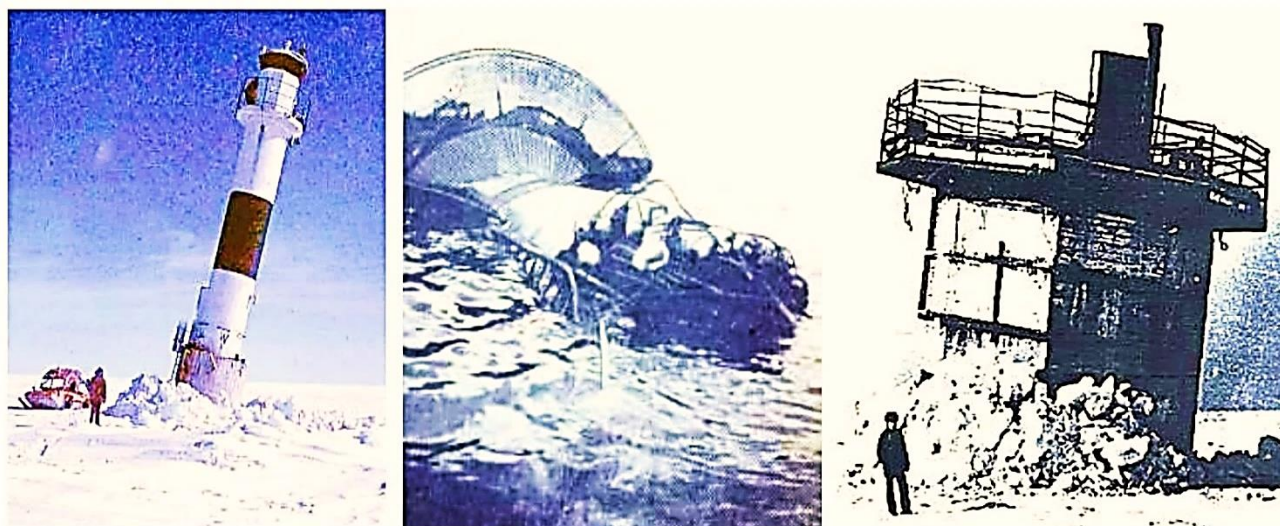


Рисунок В.1 Примеры разрушения гидротехнических сооружений дрейфующим льдом

Показано отсутствие системы нормирования метода расчетов параметров цикличности ледовых нагрузок на шельфовые сооружения на стадии их проектирования, что, в совокупности с растущими потребностями освоения замерзающих акваторий, обуславливает высокую актуальность исследования проблемы, начиная с системно – методологического анализа выявленного явления циклического разрушения льда в данной области гидротехнического строительства. Поэтому научно-техническое сопровождение решения выявленной актуальной социально-экономической проблемы должно быть направлено в первую очередь, на разработку *новой методологии расчета параметров динамической ледовой нагрузки* на основании МЛС, основанной на полном и детальном описании *процесса циклического разрушения льда* с использованием *критерия его прочности*, адекватного этому природному процессу. Эти обозначенные категории приняты в диссертации в качестве ее *цели, объекта и предмета исследования*.

В первой главе рассмотрено состояние проблемы обеспечения проектной надёжности морских ледостойких гидротехнических сооружений вертикального типа (МЛС) при воздействии циклических ледовых нагрузок. Особенностью гидрометеорологической информации для ледовитых морей является **неочевидность прогностического характера представляемой информации**. Поэтому в проектной практике используются вероятностно–статистические данные, в основном, **функции плотности распределения вероятности**, как физико-механических характеристик морского льда, так и кинематических параметров ЛП. Рассмотрены специфические условия проектирования, возведения и эксплуатации МЛС *вертикального типа* в условиях воздействия на их *цилиндрические опоры* толстого льда больших ЛП, имеющих скорости дрейфа до 1,8 - 2,0 м/с (рисунок 1.1).

Отдельные разделы главы посвящены анализу существующих методов расчета ледовой нагрузки на морские сооружения вертикального типа и их нормированию в проектной практике в России и за рубежом. В работе показано также, что начиная с 30-х годов

XX-го века разработкой всех аспектов разнообразных задач ледоведения и ледотехники по решению проблемы создания и совершенствования метода расчета ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения занимались десятки советских, российских и зарубежных исследователей. В основном, исследования касались изучения физических свойств речного льда, а также его физико-механических характеристик и реологического поведения, феноменологических особенностей процесса деформирования и разрушения льда, как в образцах, так и в массиве ледовой плиты.



Рисунок 1.1 Ледовые условия на северо-восточном Сахалине

Этими вопросами занимались многие авторы, в том числе в рамках диссертационных исследований: 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., Добродеев А.А., Долгополов Ю.В., Доронин Ю.П., Елифанов В.П., Занегин В.Г., Зарецкий Ю.К., Кантаржи И.Г., Карулин Е.Б., Карулина М.М., Ковалев С.М., Козин В.М., Козлов Д.В., Комаровский А.Н., Копайгородский Е.М., Кузьмичев К.В., Курдюмов В.А., Линьков Е.М., Лихоманов В.А., Любимов В.С., Литонов О.Е., Мансуров М.Н., Марченко А.В., Мацкевич Д.Г., Мирзоев Д.А., Назинцев Ю.Л., Недошвин О.А., Никитин В.А., Осипенко Н.М., Панов В.В., Петров И.Г.; Политько В.А., 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., Тазов Д.Н., Трусков П.А., Уварова Т.Э.,

Фарафонова А.Э., Фокеев Н.В., Фролов А.Д., Хейсин Д.Е., Храпатый Н.Г., Цуриков В.Л., Черепанов Н.В., Швайштейн З.И., Шibaкин С.И., Шульман А.Р., Шушлебін А.И., Шхинек К.Н., Якунин Л.П., а также некоторые другие и ряд зарубежных ученых.

Также в первой главе *проанализированы параметры основных типов МЛС*, реализованных на Балтике, в Бохайском заливе, приведены примеры реализованных проектов в Арктике и на шельфе о. Сахалин (рисунок 1.2). Показано, что мощность воздействия льда на МЛС определяется запасом кинетической энергии ЛП, прочностью льда и геометрическими соотношениями ЛП и опоры МЛС. Проектные размеры МЛС, масса и жесткость его конструкции, а также податливость основания наряду с характеристиками прочности льда, толщины ЛП и скоростью его дрейфа являются основными параметрами для расчетов проектной надежности МЛС. Но *действующие нормативные документы регламентируют только порядок статических расчетов* максимальной расчетной силы (ледового давления).

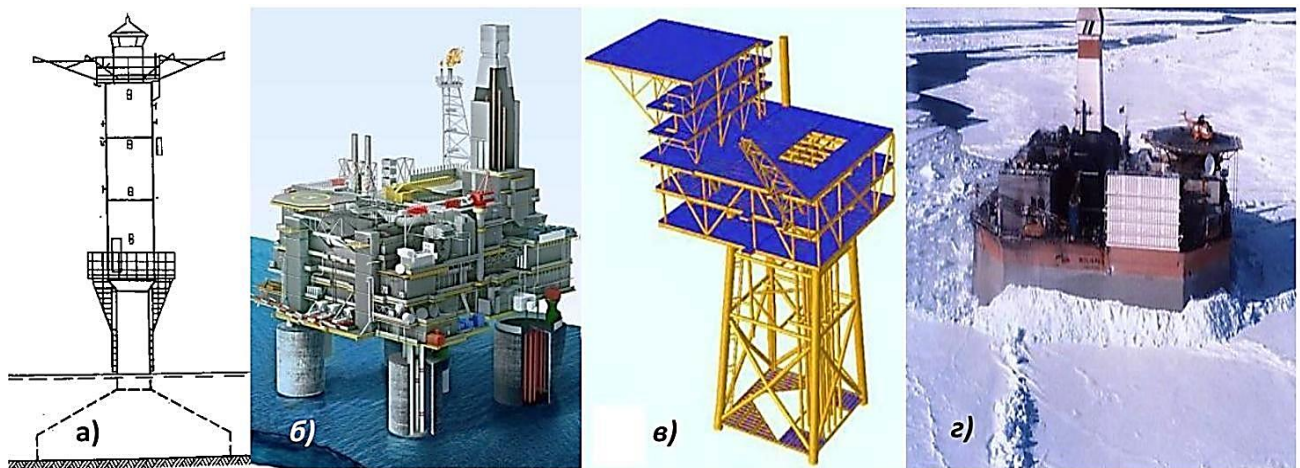


Рисунок 1.2. Основные типы рассматриваемых в работе МЛС вертикального типа

Циклические силовые воздействия на сооружение, генерируемые в процессе разрушения льда, характеризуются как максимальными значениями отдельных пиков силы, так и частотой их чередования в течение времени прорезания опорой сооружения ЛП, что может создать резонансные явления. Поэтому *МЛС должны удовлетворять требованиям как статической, так и динамической устойчивости при циклическом разрушении льда*, что обуславливает необходимость исследования природы этого явления. Адекватное математическое описание такого динамического явления возможно только с использованием фактора времени, так как именно время нарастания интенсивности напряженно–деформированного состояния в локальном объеме льда до предельного значения описывающего его критерия, несущего в себе функцию триггера, «запускающего» процесс разрушения локального напряженного объема льда, характеризует период (частоту циклов) разрушения льда.

Таким образом, исходя из показанных сущностей, автор определил путь к решению проблемы, основываясь на энергетической природе прочности и динамическом критерии разрушения льда, характеризующим не только максимум внешней силы на контакте, но и «регулирующим» время наступления этого максимума, то есть – период цикла разрушения. Проблема может быть решена дифференцированием уравнения энергетического баланса в системе ЛП – МЛС, описывающего *условие* наступления разрушения по типу условия Гриффитса: разрушение наступит в момент времени, когда *скорость диссипации энергии в нагружаемом объеме льда станет равной скорости нарастания плотности упругой энергии в этом объеме*. Поэтому формирование надежного метода расчета МЛС на циклическую ледовую нагрузку является поиском такой расчетной схемы ледовой нагрузки, которая соответствует природе механизма разрушения льда, который, в свою очередь, может быть описан соответствующим этому механизму критерием разрушения льда (рисунок 1.3).

Как следует из взаимосвязи надёжности метода определения прочностной характеристики морского льда с вероятностным прогнозом проектной надёжности МЛС, приве-

денной на рисунке 1.3, в этой методологической схеме заложены требования к соответствию вида прочностной характеристики, определяемой испытаниями образца, виду расчетных сопротивлений льда разрушению в массиве плиты и виду расчетных сопротивлений в расчетной модели (формуле) ледовой нагрузки.

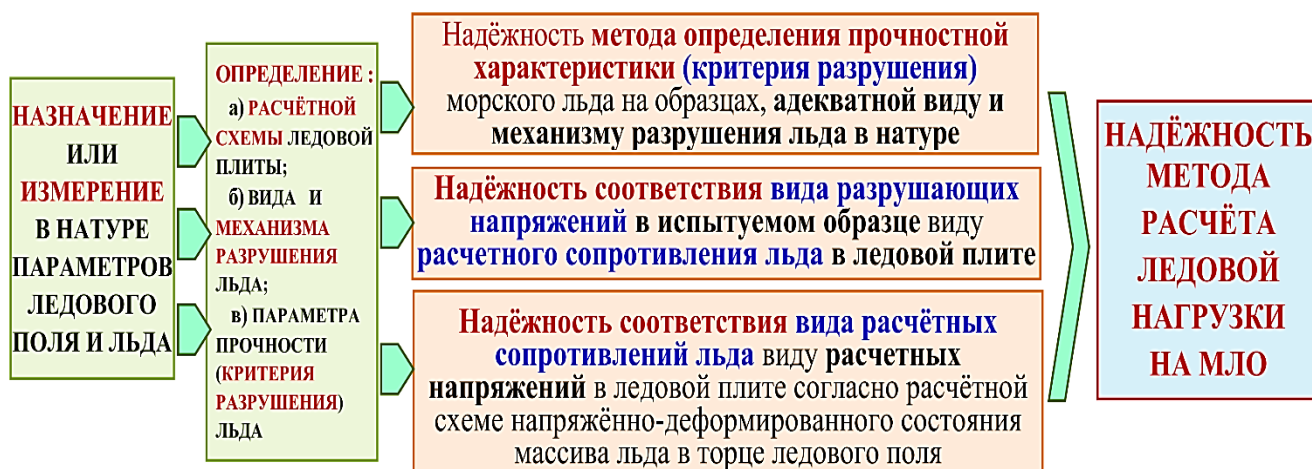


Рисунок 1.3 Взаимосвязь вероятностного прогноза проектной надёжности МЛС с надёжностью метода расчета ледовой нагрузки

Этот вывод, основанный на результатах критического анализа большинства опубликованных работ по данной теме, однозначно указывает на важность решения первостепенной задачи для дальнейших исследований – выбора «расчетного» механизма разрушения льда, присущих ему параметров и вида адекватного ему критерия разрушения.

Во второй главе работы выполнен анализ результатов экспериментально–теоретических исследований механики разрушения морского льда на контакте с вертикальными сооружениями, его результаты обобщены на рисунке 2.1.

Анализ данных по физике и механике морского льда, полученных многими поколениями инженеров и ученых показал, что морской лед имеет ярко выраженные феноменологические особенности, которые, без особых допущений не предоставляют возможности отнести его ни к континууму, как эта модель материала трактуется в теории упругости, ни к «деформируемому твердому телу», ни к другим «классическим» моделям реальных материалов. Основу структуры морского льда составляют кристаллы — твердые тела, с трехмерно-периодической пространственной атомной структурой и имеющие форму правильных или неправильных многогранников, что кардинально определяет его механические свойства и механизмы разрушения (рисунок 2.1).

Комплексность механизма разрушения морского льда такова, что на данном этапе исследований процесса его взаимодействия с сооружениями не представляется возможным описать процесс его разрушения единым критерием разрушения. Таким образом, следующим этапом в достижении цели исследования является получение временных параметров цикличности разрушения льда.


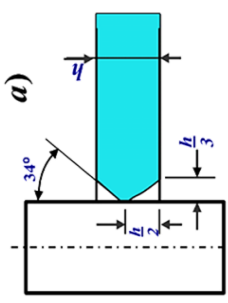
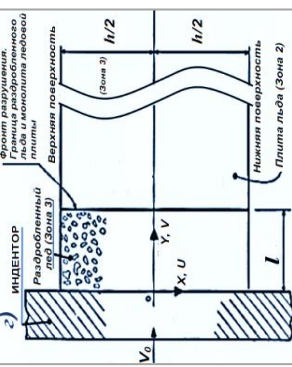
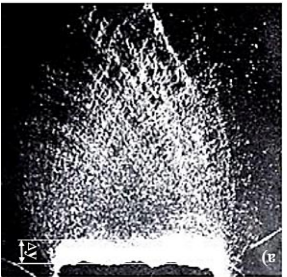
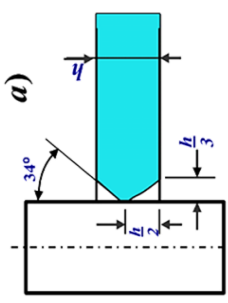
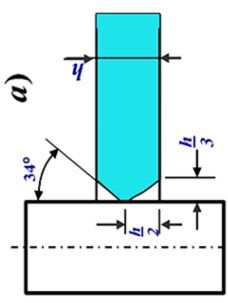
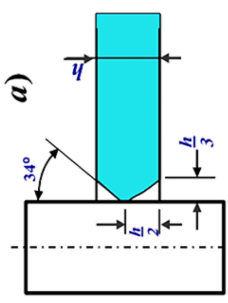
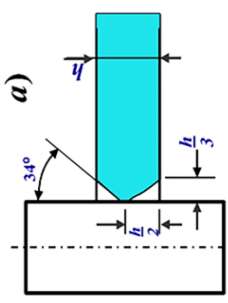
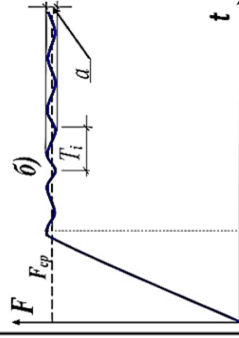
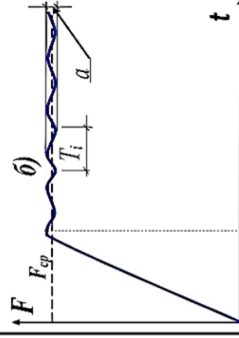
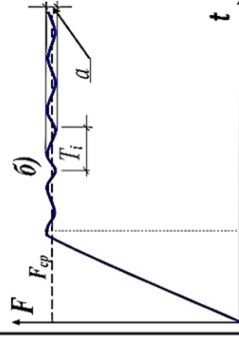
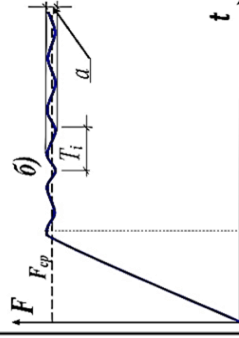
<p>ТИП МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ</p>	<p>СПЛОШНОЕ СМЯТИЕ ПО ВСЕЙ ТОЛЩИНЕ ПЛИТЫ</p>	<p>СДВИГИ «КЛИНЬЕВ» С ВЕРХУ И СНИЗУ ЛЕДОВОЙ ПЛИТЫ</p>	<p>СПЛОШНОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ СО СМЯТИЕМ И ЭКСТРУЗИЕЙ</p>	<p>СДВИГИ «КЛИНЬЕВ» И СМЯТИЕ СРЕДНЕГО КЛИНА ПЛИТЫ</p>
<p>РЕАЛЬНЫЙ ВИД КАРТИНЫ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА</p>				
<p>СХЕМА ДЛЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ</p>				
<p>ВИД ГРАФИКА ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ</p>				
<p>ЛИТЕРАТУРНЫЕ ИСТОЧНИКИ</p>	<p>Хейсин, Курдомов, Лихоманов (1976); Frederking и др. (1990); Sprengel и др. (1992); Singh и др. (1993); Tukhuri и Riska (1994); Kärnä и др. (2000); Shkhinek и др. (2001); Yue, Guo, Kärnä (2009); Wang и др. (2014);</p>	<p>Венкати (1970); Croasdale и др. (1970); Neill G.R. (1970); Schwarz (1974); Кореньков (1973, 1976); Вершинин с соавторами (1973, 1975); Кув (1980); Taylor (1981); Саэки, Озэки (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); Määttänen и др. (2011);</p>	<p>Кярnä и Turunen (1989); Jordaan and Timco (1987, 1988)</p>	<p>Вершинин с соавторами (1973, 1975); Мухомел и др. (1992); Jordaan и др. (1990-1993); Zou, Xiao, Jordaan (1996); Johnston, Croasdale, Jordaan (1998); Sodhi и др. (1998, 2001); Frederking и др. (1999); Appolonov et al. (1999); Jordaan (2001); Appolonov (2002); Sodhi (2001, 2006); Li, Frederking, Jordaan (2006); Гольдштейн, Осипенко (2011);</p>

Рисунок 2.1 Наиболее широко изучаемые виды механизмов разрушения льда и их представление моделями для расчета ледовой нагрузки на вертикальные опоры МЛС

Для этого требуется установить параметр, учитывающий как скорость процессов объемного деформирования напряженного объема льда – с одной стороны, так и строение и весь комплекс физико-механических свойств льда для его конкретного состояния, определяемого температурой – с другой. Предельное значение такого параметра, должно характеризовать начало процесса механического разрушения структуры нагруженного участка льда и, соответственно, время до разрушения. что должно определяться по результатам экспериментов с натурным льдом,

В главе 3 выполнен системно – методологический анализ макромеханических закономерностей циклического разрушения морского льда при взаимодействии с вертикальными опорами морских гидротехнических сооружений. Необходимость выполнения процедур системного анализа совокупности объектов ЛП – МЛС обусловлена очень противоречивыми результатами исследований явления разрушения льда при взаимодействии ледовых полей с опорами МЛС разными авторами (рисунок 2.1). В то же время исследуемые здесь явления – *прорезание ледового поля* (объект Ледовое поле) и *колебания ледостойкого сооружения* (объект МЛС) связаны одним процессом, результатом которого является *послойное циклическое разрушение льда*, не имеющее места в природе при поэлементном исследовании каждого из этих объектов. То есть, *процесс разрушения льда* является *интегративным (эмерджентным) свойством*, которое является одним из основных признаков Системы, наряду со структурой, целостностью и ее целью.

Системный подход к решению рассматриваемой проблемы позволил однозначно определить *роль механизма разрушения льда* в функционирующей природно – технической системе ЛП – МЛС *как ее процессора*, обеспечивающего достижение системой ее цели – *проектного обеспечения стабильного состояния МЛС*, работающего в сложной совокупности многих природных систем (водная и воздушная среда, ледовый покров, сооружение, грунты дна акватории и пр.) в условиях мощной ледовой нагрузки на МЛС (рисунок 3.1).

Таким образом, система ЛП–МЛС конструктивно определена как техническая система с **единством входа, выхода и процессора**, обеспечивающего упорядоченную реализацию эмерджентной функции системы для достижения ее **цели** – гомеостатичности её основного свойства – **свойства ледостойкости**, то есть – стабильного и устойчивого 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 данной системы целью является бесперебойная эксплуатация оборудования буровой платформы, обеспечивающая добычу нефти и газа на шельфе с адаптацией к условиям воздействия дрейфующих ледяных полей.

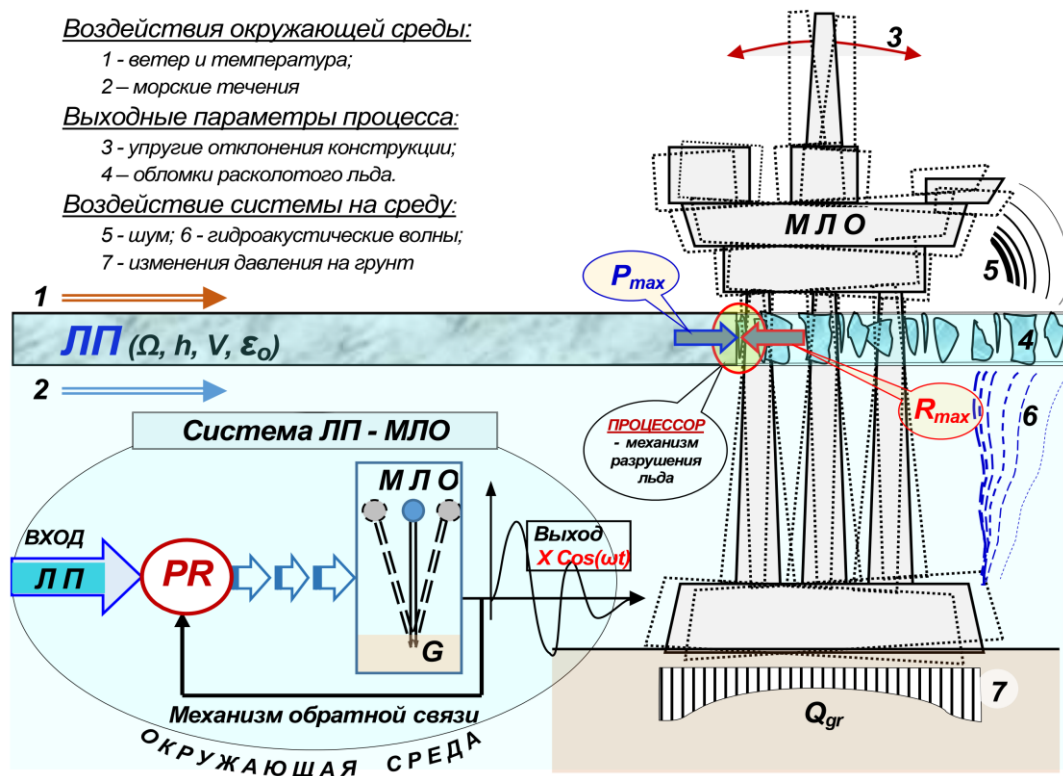


Рисунок 3.1 Дескриптивное описание совокупности объектов системы ЛП – МЛС во внешней среде и ее функционально – конструктивное представление

Основной функцией процессора рассматриваемой системы «ЛП–МЛС», согласно принципу функциональности, является **циклическое преобразование потока кинетической энергии** движущегося ледового поля в энергию упругого сжатия льда и энергию упругого отклонения сооружения с ее **периодическим и главное, своевременным, с точки зрения сохранности устойчивости сооружения сбросом, точнее** – переходом в поверхностную энергию блоков и осколков разрушенного льда и удлинения трещин в его массиве. Именно такого рода упорядоченное преобразование механической энергии из одного вида в другой и называется «механизм разрушения льда», который обеспечивает состояние устойчивого равновесия системы ЛП–МЛС во времени. В этом механизме природой в единице объема льда с учетом его физического состояния и состояния его структуры (температуры, солености, пористости) «запрограммировано» предельно допустимое для него значение плотности упругой энергии, которое вызывает разрушение льда. Это значение (E_k) **не должно превышать значения энергии**, требующейся для отклонения сооружения от статического состояния до значения критической амплитуды (a_k) , при которой сооружение теряет устойчивость либо разрушается один из его несущих конструктивных элементов.

Выполненная в этой главе попытка описать динамический процесс прорезания опорой МЛС массива ЛП с использованием действующей «статической методологии» для решения контактной задачи, в виде решения дифференциального уравнения движения тела в среде с сопротивлением, дала лишь результат для внедрения опоры в ЛП, имеющего конечное

значение массы с последующей его остановкой, что не является расчетным случаем для решаемой проблемы.

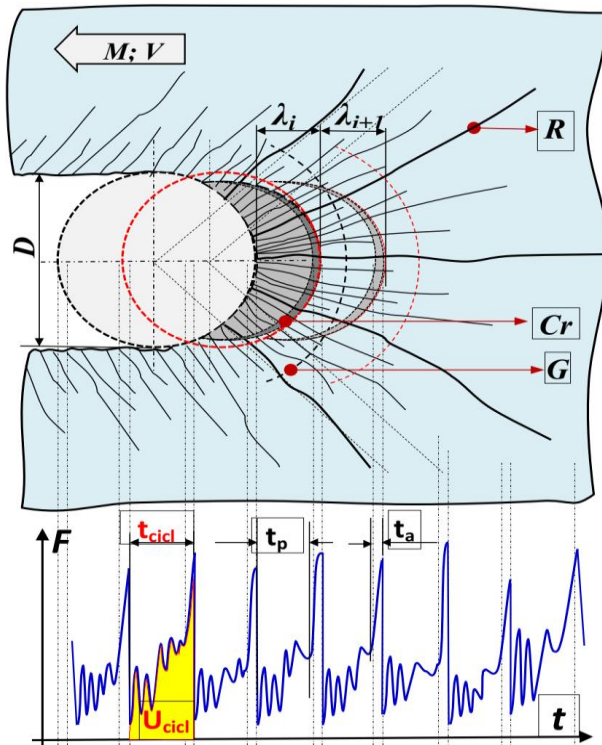


Рисунок 3.2 Графическое представление концептуальной модели послойного разрушения льда на опоре МЛС

тичного материала при статическом вдавливании в его поверхность плоского штампа (Спивак и др., 1975).

Представленное ниже решение получено при нескольких стандартных для таких задач допущениях и базового условия: **монолит льда с** отдельными радиальными (R) и горизонтальными кольцевыми трещинами (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**. Отсюда считается, что всесторонне сжатый элементарный объём льда в массиве или отдельном большом блоке льда, имеющих ненарушенную естественную структуру, внутри очередного слоя разрушения λ_i может находиться только в двух состояниях: не разрушенном – **состояние 0** (λ_i^0) и раздробленном – **состояние F** (λ_i^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 (фронта разрушения)** в

Поэтому для ее решения в **заключительном разделе** главы разработана **концептуальная феноменологическая модель разрушения льда**, как полупространства из упруго-хрупкого материала, в поверхность которого внедряется индентор. В применении к ледовой плите и опоре сооружения эта модель представлена на рисунке 3.2. Математическое описание исследуемого явления разрушения льда для получения количественных характеристик затрат энергии на этот процесс выполнено по аналогии с описанием процессов динамического внедрения жесткой сферы в полупространство из хрупкого материала (Черепанов, 1974) и порядком развития разрушений в полупространстве мало-

физическом пространстве на глубину слоя λ_i в виде спонтанного развития сети трещин, порождающих массу *первичных продуктов разрушения* (обломки блоков и кристаллов льда). Учитывая, что скорость взаимодействия движущегося ледяного поля и сооружения не большая и значение плотности льда не может измениться в процессе взаимодействия больше чем на 4-6 % (от 0,926 до 1,0), уравнение сохранения энергии в этом случае примет вид

$$\varepsilon_{cr} = U_0 + U_F, \quad (1)$$

т.е. упругий потенциал претерпевает скачок на поверхности разрушения.

Это условие, по аналогии с критерием Гриффитса, формулируется, например, Черепановым Г.П так: *минимально необходимое количество упругой энергии, высвобождающейся вследствие хрупкого разрушения (и приходящееся на единицу массы материала), есть постоянная величина для этого материала*. Поэтому, для дальнейшей разработки научно-обоснованной методологии определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки в системе «ЛП -МЛС», *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^* . Доказательство принятой гипотезы в последующих главах работы стало основой для синтеза расчетной базовой модели, описывающей нагрузки на морское сооружение с использованием этого динамического критерия разрушения льда, *численные значения которого следует получать экспериментально*.

В главе 4 с целью экспериментального определения расчетных значений динамического критерия разрушения льда выполнен ряд процедур **экспериментально – теоретического моделирования процесса циклического разрушения морского льда при динамическом внедрении в него жесткого индентора**.

В качестве экспериментального метода принят метод «свободно падающих сфер» (далее – DBT метод). Метод основан на гипотезе, предполагающей интегральное отображение всего комплекса разрушений льда (дробления, смятия и экструзии продуктов разрушения, трещин в его массиве, сдвигов, преодоления сил трения на контакте и т.д.) в объеме остаточного отпечатка – каверны – «лунки». Численное значение удельной энергии механического разрушения льда ε_{cr} вычислялось как отношение численного значения энергии падающего тела U_T (затраченной на разрушение льда) к массе льда с плотностью ρ в объеме w образовавшегося в поверхности ледового поля отпечатка.

Эксперименты проведены с помощью передвижного копра с лебедкой, набора чугунных полусферических инденторов с различными массами от 67 до 300 кг и радиусами кривизны активной поверхности от 16 до 30 см. Скорость внедрения варьировалась от 0,1 до 3

м/с. Для записи на светолучевой осциллограф процесса удара использовался акселерометр. Объем отпечатка (лунки) рассчитывался по его диаметру D_0 во льду. 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.

Изучение *картины контактного разрушения морского льда* показало, что при внедрении жесткого индентора в поверхность ледяного покрова, лед может проявлять различные свойства в зависимости от его температуры (рисунок 4.1-а). В случае «теплого» льда, в зависимости от запаса кинетической энергии сферы, она внедряется в его поверхность по схеме воздействия индентора на полупространство из упруго-пластического или даже пластического материала (рисунок 4.1-а). В данном случае явления выраженного циклического разрушения не наблюдается. При температуре ниже минус -8°C и скорости внедрения сферы $V_0 > 0,5$ м/с морской лед практически всегда разрушается хрупко (Рисунок 4.1-б), поэтому в расчетах ледовой нагрузки на препятствия механизм его разрушения может описываться как разрушение упруго-хрупкого материала.

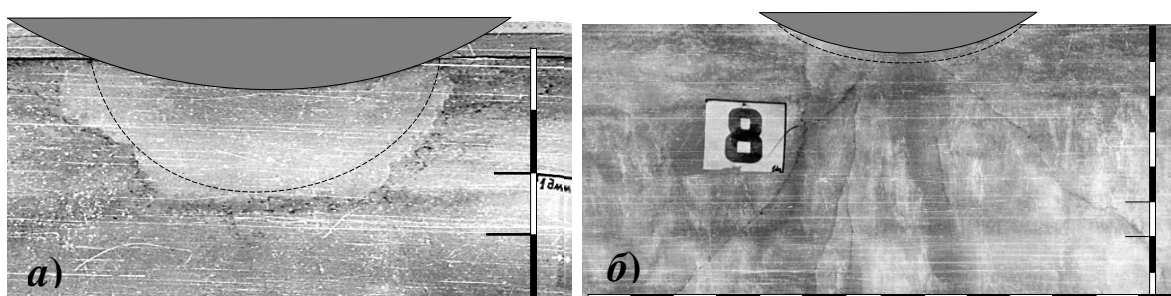


Рисунок 4.1 Фотографии разрезов массивов морского льда по оси внедрения жесткой сферы массой $M = 163$ кг и радиусом $R = 28,3$ см, сброшенных с высоты 1,2 (а) и 2,2 м (б) на поверхность морского ледяного покрова, толщиной 75-80 см при температуре льда -4°C (а) и -10°C (б), по данным автора

Существенная часть исследований, выполненных в этой главе были направлены на **процедуры по верификации метода** экспериментального определения удельной энергии механического разрушения льда \mathcal{E}^* , как **энергетической метрики его прочности**, являющейся основой предлагаемой **математической модели**. **Инвариантность** метода к условиям эксперимента была подтверждена проведением **полнофакторного эксперимента** по определению численных значений величины \mathcal{E}^* , который выполнялся по плану типа $N = 2^3$. В качестве варьируемых факторов были приняты **масса** и **скорость** индентора (M и V) и **температура** льда $T^{\circ}\text{C}$, определяющая его физическое состояние.

Основной вывод: значения удельная энергия механического разрушения морского льда \mathcal{E}^* имеют зависимость только от температуры (рисунок 4.2-а), которая есть единственный фактор, влияющий на значение выходного параметра \mathcal{E}^* .

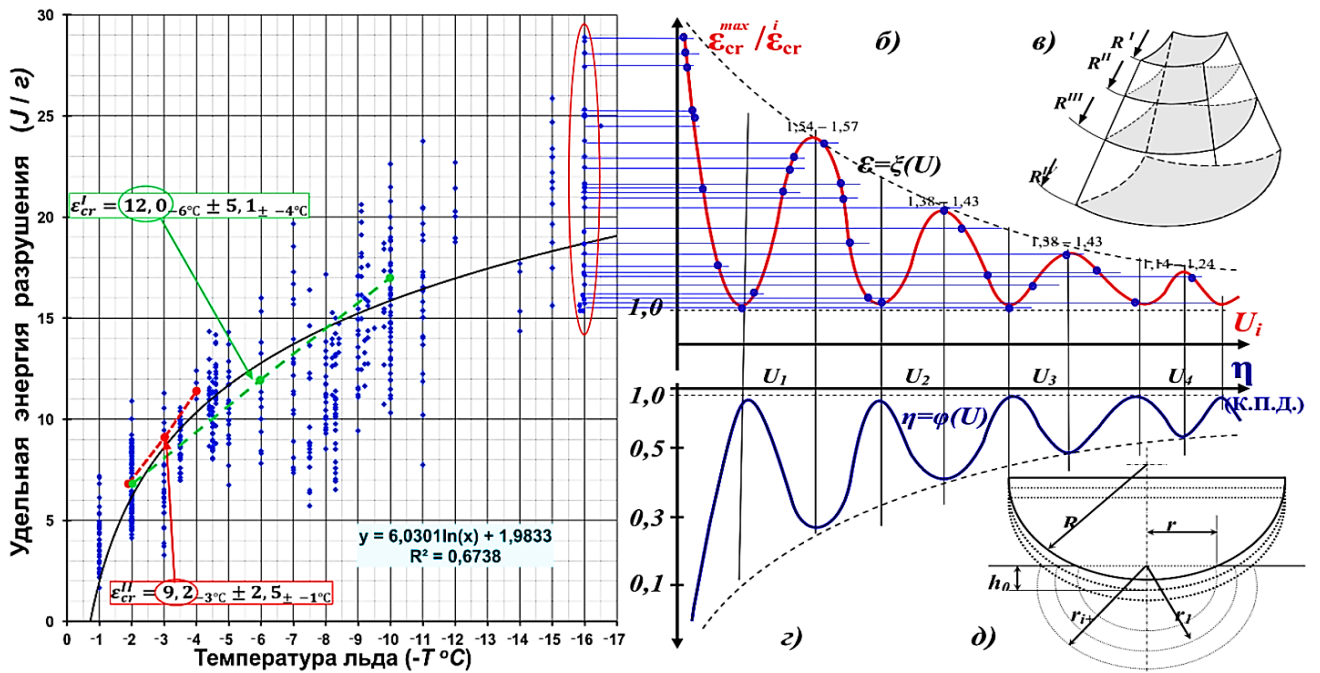


Рисунок 4.2 Зависимость удельной энергии механического разрушения морского льда \mathcal{E}^* от температуры (а) и график изменения этой величины в зависимости от кинетической энергии сферы-индентора

Эксперимент показал также, что диапазоны значений величины \mathcal{E}^* , определяемой при одном конкретном значении температуры имеют «не очевидный» большой разброс. Это объясняется тем, что здесь результаты определения значений этой величины, получены при различной энергии удара U_{cr} падающего индентора. Результаты опытов, проводившихся при одной температуре льда, но при использовании полусфер разной массы и при различной высоте их сброса показали, что график зависимости $\mathcal{E}^* = \varphi(U_{cr})$ имеет «волнообразный» характер (рисунок 4.2, б). И это оказалось **серьезным препятствием** к получению \mathcal{E}^* с гарантированной **достоверностью** определения расчетных значений исследуемого критерия разрушения льда.

Тщательный анализ результатов экспериментов подтвердил ранее принятую гипотезу о циклическом процессе упруго – хрупкого разрушения льда, связанном с природой **послойного разрушения** при накоплении упругой энергии в слое льда в напряженной зоне (рисунок 4.2, б-д) до критического значения ее плотности \mathcal{E}_{cr} . При этом, феномен **послойного разрушения льда проявляется несколько раз** в процессе одного акта **внедрения сферы-индентора** в массив льда.

Учитывая особенности задачи, *энергия сопротивления* напряженного объема льда $U(t)$ внедрению в него опоры сооружения *в каждый момент времени* запишется основным законом термодинамики в виде разницы упругой (е) и диссипировавшей (d) энергий:

$$U(t) = Ue(t) - Ud(t), \quad (4.1)$$

Во всех случаях это условие разрушения, в принятой в данной работе энергетической концепции его описания, 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 \mathcal{E}_{cr} , то есть превысит уровень плотности внутренней упругой энергии покоя \mathcal{E}_0 на величину $\Delta\mathcal{E}_e$ что приведет к разрушению этого, наиболее напряженного элементарного объема льда (r^*) и далее – к спонтанному процессу «цепной реакции» разрушений в некотором макрообъеме. Это условие записывается в виде двух соотношений:

$$\mathcal{E}_e(r^*, t) = \mathcal{E}_0(r^*, 0) + \Delta\mathcal{E}_e(r^*, t^*) \geq \mathcal{E}_{cr} = const \quad (4.2)$$

$$\frac{\Delta\mathcal{E}_e(\bar{r}^*, t)}{dt} = \left(\frac{dU_e(t)}{dt} - \frac{dU_d(t)}{dt} \right) \leq 0. \quad (4.3)$$

Уравнения (4.1) – (4.3) могут быть интерпретированы графически (рисунок 4.3). Предельным значением плотности удельной упругой энергии, вызывающей разрушение льда, согласно уравнению (4.3), является значение \mathcal{E}_{cr} (точка X на рисунке 4.3, а). Уравнение (4.1) описывает механизм регулирования энергетического обмена между ЛП и МЛС 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 из множества других, составляющих деформируемый макрообъем в зоне контакта, мощность поглощения (диссипации) энергии U_d снизится ввиду истощения возможностей его структуры и текстуры деформироваться пластически (объединять

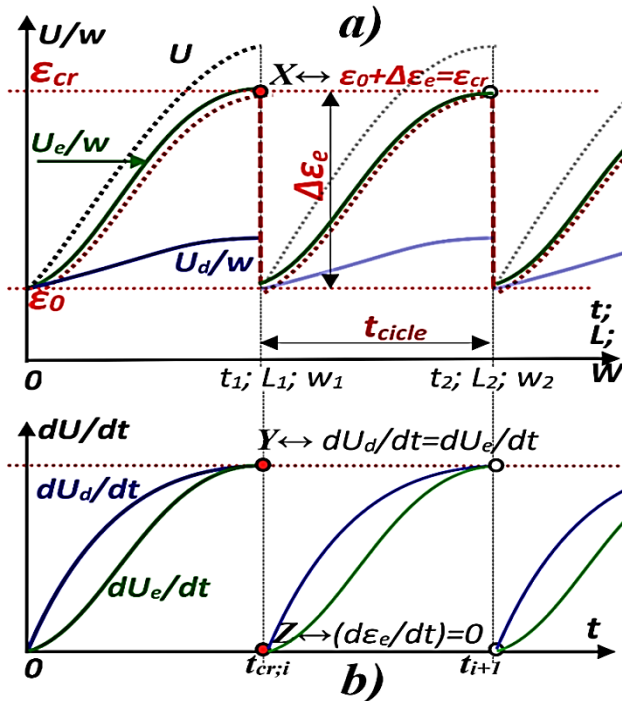


Рисунок 4.3 Структурно–энергетическая интерпретация процесса формирования механизма циклического разрушения льда на контакте ЛП с МЛС

поры, рекристаллизоваться и пр.) и начнет расти скорость «насыщения объема» упругими деформациями, повышая удельную плотность упругой энергии U_e .

В момент времени $t_{cr,i}$ скорость прироста упругой энергии в напряженном объеме льда сравнивается со скоростью ее диссипации – точка Y на рисунке 4.3, б. Т.е. правая часть уравнения (4.3) обращается в ноль, что будет соответствовать максимальному значению прироста упругой энергии $\Delta\mathcal{E}_e$ (ввиду обращения в ноль ее производной — точка Z на рисунке 4.3, б) и плотность упругой энергии, согласно (4.3) достигнет критериального значения разрушения льда: $\mathcal{E}_0 + \Delta\mathcal{E}_e = \mathcal{E}^*$ (точка X на рисунке 4.3, а). Разрушение произойдет в момент времени t_{cr} , затем цикл нагрузки –

разрушения повторится в объеме следующего слоя льда. Диаграмма этого процесса $\mathcal{E}_e = f$

$(V_{ice}; t)$ имеет пилообразную форму и изображена пунктиром красного цвета на рисунке 4.3-а. Здесь *параметр времени* – один из основных параметров процесса, не только определяющий **момент** начала разрушения льда (t_{cr}) и начала высвобождения упругой энергии, накопленной в его объемах, но и характеризующий тип деформирования и разрушения морского льда, характеризуемый **скорости прироста (мощности) упругой энергии в единичный объем льда**.

Описанные в четвертой главе результаты исследования стали основой для разработки имитационной модели для расчета ледовой циклической нагрузки от ЛП на МЛС.

В пятой главе разработана динамическая имитационная модель циклической ледовой нагрузки на шельфовые сооружения на базе энергетического критерия объемного разрушения льда. Следуя цели данного исследования и в соответствии с ГОСТ 27751-2014, с учетом динамического характера воздействия, в качестве расчетных параметров **должны быть заданы:** а) – интенсивность (амплитуда), место приложения, направление и продолжительность действия *ника силы* давления ледового покрова на опору МЛС и б) – *закон изменения нагрузки во времени* или *характерные частоты* и, при необходимости, фазовые углы и *спектральные характеристики* (энергетический спектр, авто- и взаимные корреляционные функции. Здесь показано, что последовательная реализация **всех элементов разрабатываемой в данном исследовании методологии** «работает на результат» – на определение выходных характеристик расчетной модели ледовой нагрузки для дальнейшего их применения в динамическом расчете сооружения.

Для моделирования реакции МЛС на динамическую ледовую нагрузку, как известно из курса динамики сооружений, необходимо в правой части уравнения динамической модели записывать 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. Но здесь следует учитывать вывод, полученный из анализа механизмов и моделей разрушения льда, показанный во второй главе: комплексность механизма разрушения морского льда такова, что на данном этапе исследований процесса его взаимодействия с сооружениями не представляется возможным описать процесс его разрушения единым критерием разрушения – одного вида разрушения, потому что этот процесс комплексный.

Это действительно так, что наглядно показано на рисунке 5.1. где приведены результаты полунатурного эксперимента автора по динамическому внедрению модели опоры в торцевую грань большого блока натурального морского льда. Эти эксперименты показали, что имитационную модель этого явления следует формировать путем описания полученного в экспериментах сложного механизма разрушения льда – как единого (интегрального на глубину слоя разрушения льда) стохастического процесса, включающего комплекс частных процессов сколов, сдвигов, смятия, раскалывания, выжимания крошки льда из зоны контакта и пр.

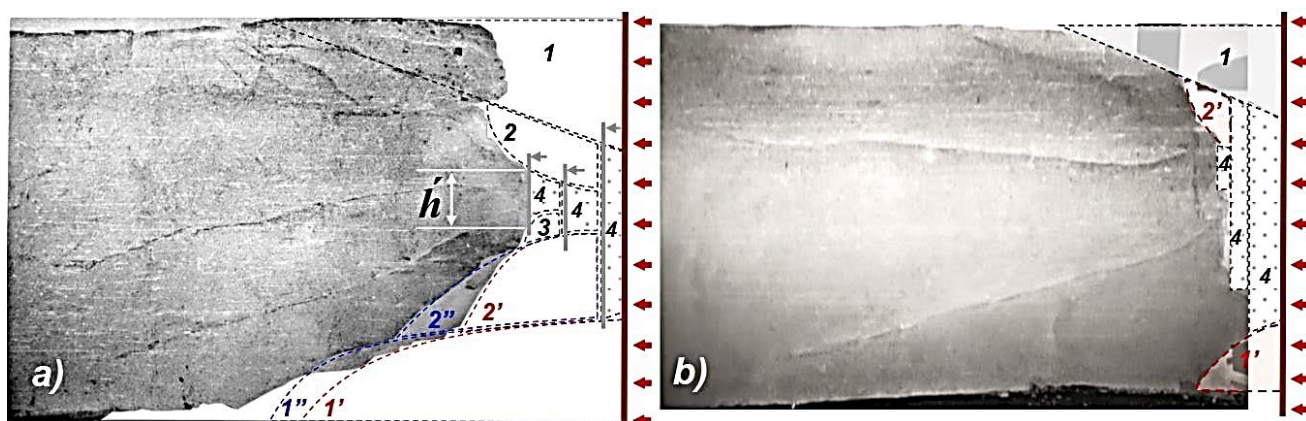


Рисунок 5.1 Фотографии зон разрушения кромки льдины (среднего клина в плане) сжатием при взаимодействии с моделью цилиндрической вертикальной опоры

Такая модель сформирована и ее дескриптивное и функциональное описания приведены в шестой главе (рисунок 6.5). Опираясь на результаты выполненных полунатурных экспериментов (рисунки 5.1 и 6.2) более корректным способом определения численных значений критерия динамического разрушения льда является способ испытания больших образцов льда, подобных блокам цельного льда, образовавшимся в торцевой части ЛП между вертикальными и горизонтальными магистральными трещинами в массиве ЛП, которые в процессе прорезания ЛП опорой постоянно «растут», поддерживая постоянное образование таких блоков-консолей в толще ЛП.

С этой целью апробации «работоспособности» имитационной динамической модели циклического разрушения льда далее, в этой главе процесс возникновения колебаний МЛС под действие ЛП, имеющего постоянную скорость, рассмотрен в рамках системного анализа, проведенного в главе 3: в **системе ЛП и МЛС** (рисунок 5.2) эти объекты, взаимодействуя между собой, порождают *новые явления*, не характерные для каждого из них вне системы: процесс *разрушения льда* и процесс *колебаний сооружения*.

Колебания сооружения в системе ЛП—МЛС, как следует из исследований автора приведенных в третьей и четвертой главах, будут поддерживаться *порциями энергии* от дрейфующего 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* (рисунки 4.3 и 5.2, -а, -б). Здесь процессор – механизм разрушения льда, 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.

Этот регулятор — виртуальный *самопрограммируемый процессор*, выполняющий как функции интегрирования скорости нелинейного притока упругой энергии по переменному во времени и в пространстве напряженному объему льда, так и мощности ее диссипации в элементах этого объема с учетом температуры льда, его структуры и солености. Нулевое значение непрерывно вычисляемой разницы этих двух параметров указывает на достижение критического (порогового) значения *плотности потенциальной*

удельной энергии, что приводит в действие механизм сброса упругой энергии – разрушения этого объема льда.

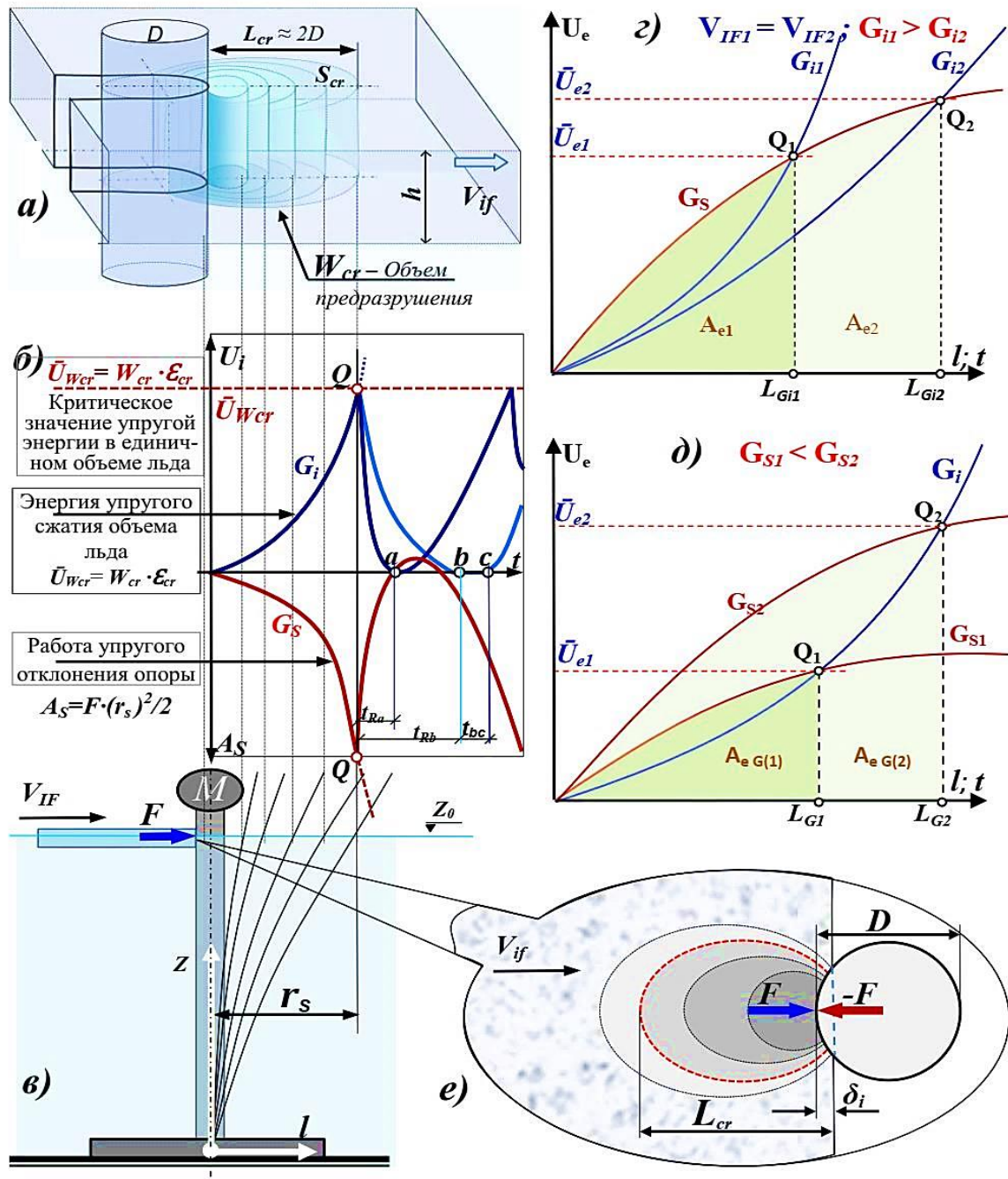


Рисунок 5.2 Процесс возникновения колебаний МЛС (а-в), возбуждаемых циклическим разрушением льда на контакте с ЛП в процессе их взаимодействия при постоянной скорости ЛП (V_{if}) для разных сочетаний (г-д) жесткости льда (G_i) и сооружения (G_s)

Этот стационарный процесс с механизмом циклического разрушения льда, генерирующим под его действием колебания МЛС, показан на рисунке 5.2, где рассмотрен 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 . В активной фазе взаимодействия приток кинетической энергии $\Delta U_{ЛП}$ от ЛП в зону контакта в течение одного цикла нагружения происходит непрерывно,

уровень потенциальной энергии U_w в напряженном объеме ЛП Wcr повышается (рисунок 5.3, б) и одновременно производится работа по отклонению основания ледостойкого сооружения A_s . Процесс образования циклов разрушения льда понятен из рисунка 5.2.

На некотором отрезке времени в системе ЛП – МЛС в процессе их взаимодействия достигается энергетический баланс – тождество (точки Q_i на графиках рисунка 5.2, б, г) которое *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 5.2, а) будет «сброшен» и:

– потенциальная энергия упругих деформаций в структуре напряженного единичного объема льда ϵ^* скачком перераспределится на вновь образованные поверхности трещин в массиве ЛП и на поверхности обломков льда, и состояние льда 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.

В главе 6 дано определение расчетных параметров для расчета циклической ледовой нагрузки на вертикальные сооружения шельфа с использованием энергетического критерия разрушения льда. Здесь, с учетом результатов уже выполненных исследований и требованиями ГОСТ 27751-2014 решены запланированные для достижения цели работы **четыре методологические задачи: 1)** – конкретизирован «расчетный» механизм разрушения льда для разработанной имитационной модели и *разработан* соответствующий ему по физической природе и геометрии задачи *новый, «более прямой» эмпирический способ определения численных значений критерия разрушения ϵ^* путем испытаний больших образцов на динамическое сжатие; 2)* – разработана *методика расчета значений параметров* циклической ледовой нагрузки на МЛС; **3)** – выполнены процедуры *верификации метода* расчета параметров циклической ледовой нагрузки; **4)** – даны *рекомендации по применению нового критерия* динамического механического разрушения льда в расчетах параметров циклическости процесса.

Решение *первой задачи* выполнено путем теоретических исследований процесса взаимодействия торца ЛП с вертикальной опорой МЛС (рисунок 6.1, а, е) и имитационным моделированием этого процесса в программе LS-Dyna в пакете ANSYS с использованием МКЭ путем создания 2D и 3D МКЭ - моделей (рисунке 6.1, -а₁, -е₁). Полученные результаты «замкнули» триаду моделирования процесса этого сложного физического явления с описанным в пятой главе процессом физического моделирования.

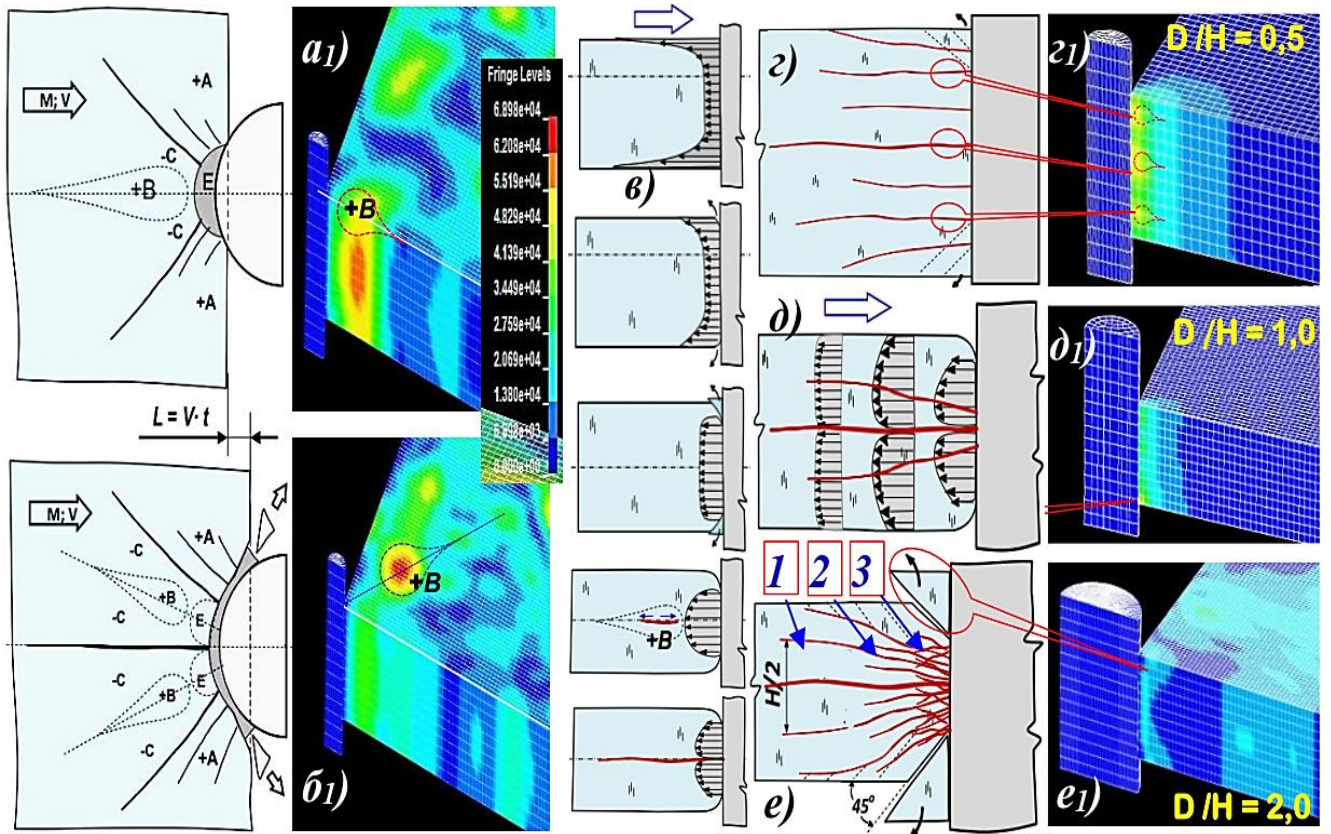


Рисунок 6.1 Результаты теоретического и компьютерного моделирования развития механизма разрушения льда в зоне контакта ЛМ с опорой МЛС

В итоге разработанная в диссертации имитационная модель (рисунок 6.5) получила убедительную верификацию ее основных параметров результатами описанных здесь **полунатурных экспериментов автора**, которые позволили сформулировать ряд **важных** однозначных **выводов**. Наиболее общим из них является вывод о том, что 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. Учет затрат энергии на весь объем работы, совершаемой во всех «отдельных» процессах разрушения льда в контактной зоне, производится на основе закона сохранения энергии суммированием «частных расходов» энергии. Критерием 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 о том, что *характер накопления потенциальной упругой энергии* в объеме льда при его упругом деформировании, как показывает сравнение осциллограммы выполненного в работе эксперимента с записью осциллограммы в опыте японских исследователей по медленно (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 (Рисунок 4.3).

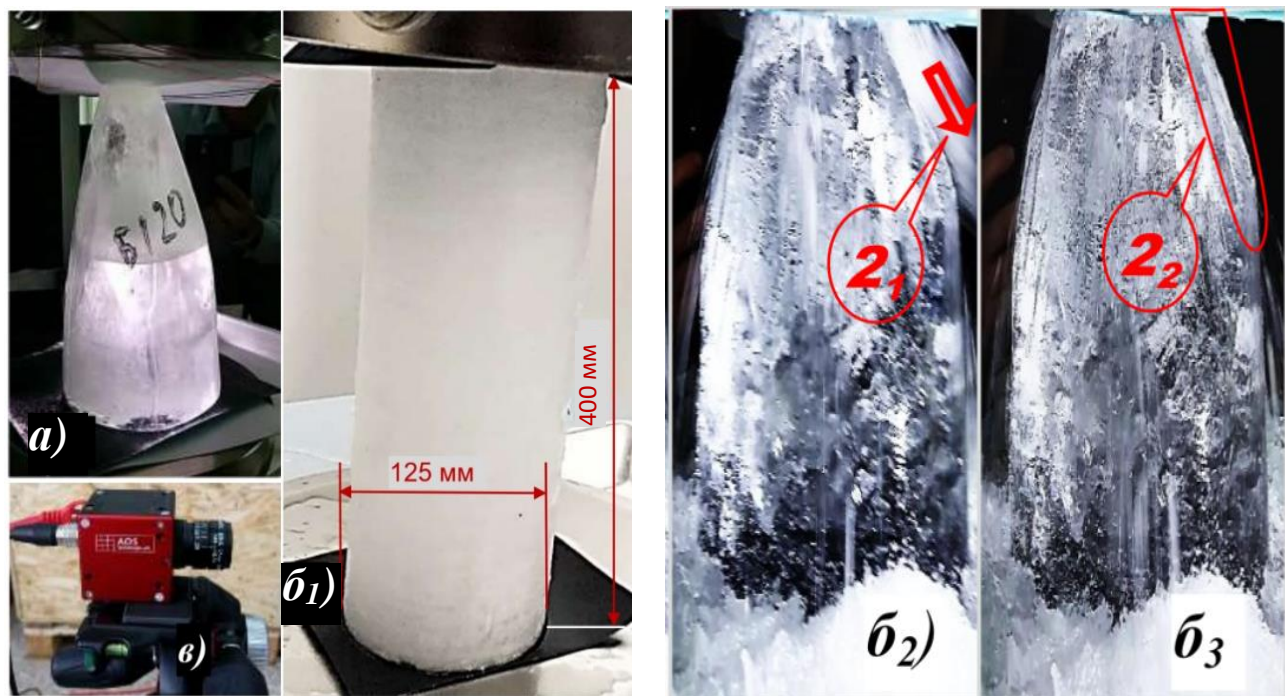


Рисунок 6.2 Способ определения эффективных значений удельной энергии разрушения льда ϵ^* испытаниями образцов льда способом динамического сжатия больших образцов в лаборатории на машине *Shimadzu AG100kNXplus* при постоянных скоростях перемещения нагружающей верхней плиты. 1; 2; 2,5; 3; 5 мм/с

Еще один вывод говорит о том, что как *«отдельные» процессы разрушения* специфического 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.

Результаты выполненных полунатурных, численных и лабораторных экспериментов (рисунки 5.1, 6.1, 6.2) дали основание к принятию гипотезы, состоящей в том, что в качестве *представительного объема* разрушаемого массива льда в *разрабатываемой методологии решения поставленной в диссертации проблемы* необходимо **использовать образец, геометрически подобный разрушаемым блокам льда в массиве ЛП** для его испытания с **начальными и граничными условиями идентичными реальным условиям общего процесса разрушения льда в торцевой части ЛП** на его контакте с опорой МЛС. Разработка комплекса доказательств указанной гипотезы обозначила путь решения **второй** методологической задачи.

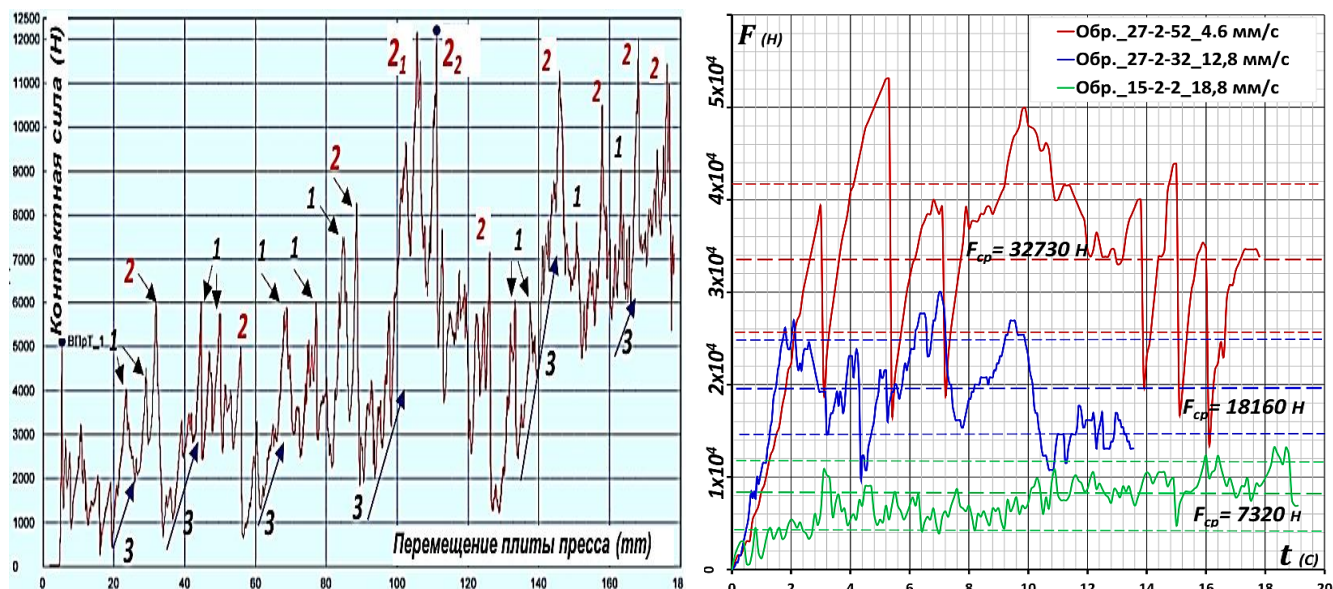


Рисунок 6.3 Сравнение процессов разрушения льда сжатием при постоянной скорости: а) – при динамическом сжатии блоков (образцов) льда на механическом прессе; б) – при прорезании натурального морского льда в майне моделью опоры

Реализуемая картина разрушения крупного блока льда на механическом прессе **полностью подобна** картине явлений разрушения льда наблюдаемым в реальных условиях и описанной в работах автора и многих исследований. И, в то же время, механизм циклического разрушения льда в блоке (рисунок 6.3, а) **подобен** механизму разрушения льда в торцевой части ЛП, формирующего ледовую нагрузку на сооружение в виде **пилообразной кривой**, интегрально отображающей комплексный процесс разрушения льда как показано на рисунке 6.4,б, где приведены некоторые результаты измерений в экспериментах 1987-1990 гг. на льду Амурском залива.

Таким образом, **решение второй задачи получено** комплексом последовательных решений составляющих ее отдельных задач: а) – **достоверным определением типов блоков – образцов льда**, образующихся в результате развития вертикальных радиальных трещин в монолите льда перед опорой МЛС в зоне его контакта с ее поверхностью (рисунки 6.1; 6.2); б) – **разработкой способа испытания** больших образцов (рисунок 6.2); в) – **методом** определения эффективного значения удельной энергии разрушения льда \mathcal{E}^* ; г) – **методом расчета параметров** циклической ледовой нагрузки использованием принятой имитационной модели взаимодействия ЛП с вертикальной цилиндрической опорой МЛС. На разработанные в процессе решения указанных задач полезные модели типа «образец» и на способ испытания образца с целью определения критерия разрушения автором получены 4 патента.

Процесс разрушения льда в большом образце, аналогично натурному процессу на контакте ЛП с вертикальной опорой МЛС **происходит неравномерно и хаотично** по площади контакта при **случайном повторении характерных явлений**, подчиняющихся закону нормального распределения. На рисунке 6.3,а стрелками отмечены характерные элементы (события) процесса разрушения льда образца, подобные явлениям разрушений

льда на контакте: 1 – процессы сопротивления отдельных обломков растрескавшегося льда в слое разрушения; 3 – скалывание небольших объемов на периферии и в средней зоне контакта; постепенный рост контактной силы к 110-й с процесса и 2₁ и 2₂ – откалывания сначала крупного «треугольного», затем «плоского» блоков (например как на рисунках 6.2, б₁ и б₂) – с резким падением контактной силы.

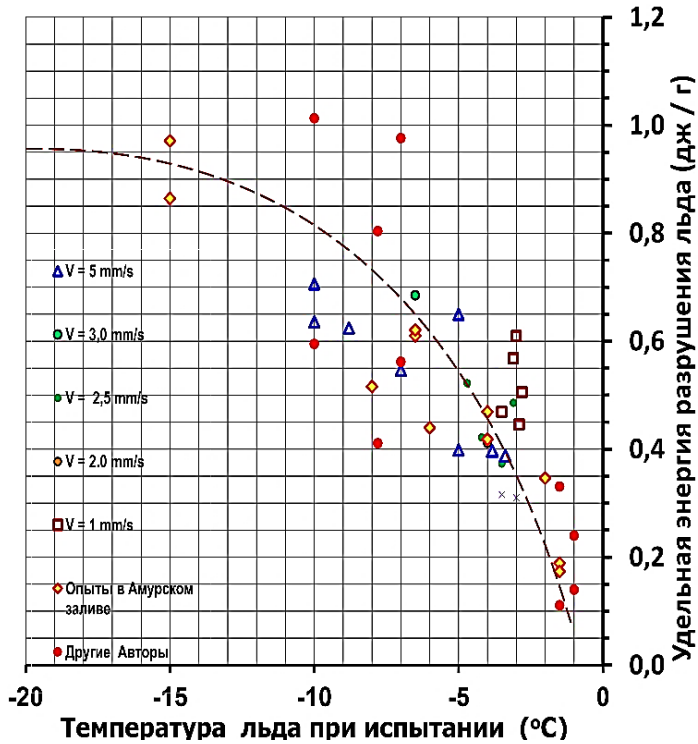


Рисунок 6.4 Зависимость энергетического критерия разрушения льда от температуры

В соответствии с порядком развития процессов разрушения в принятой имитационной модели (рисунок 6.5, а), на некотором текущем этапе, после сколовшегося блока 1*, лед в слое A_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 A_1 под углом α к верхней поверхности плиты из дефекта структуры, случайным образом расположенном во льду, спонтанно развивается трещина сдвига (требующая значительно меньших энергозатрат из-за влияния свободной грани), 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 $\mathcal{E}e$, развиваются менее масштабные сколы боковых поверхностей этого участка и развитие трещин в его центре (рисунок 6.3) с последующим смятием кромки льда на величину A_1 до момента, когда вертикальный размер контакта достигнет значения h_1 . Затем, при постоянной скорости дрейфа ЛП процессы повторяются в последующих слоях напряженного объема льда.

Полученные значения эффективной удельной энергии разрушения льда \mathcal{E}^* в зависимости от его температуры приведены на рисунке 6.4, кривая идентичная виду такой зависимости для этой величины, получаемой ранее многими исследователями (см. рисунок 3.4) DBT методом, но ее численные значения в данном случае *на порядок меньше*, что согласуется с данными полученными автором для опытов по прорезанию натурального льда моделями опор в Амурском заливе сотрудниками кафедры гидротехники в 1987 г., а также и другими исследователями (например Sodhi и др., 1984) для условий прорезания ЛП моделью опоры.

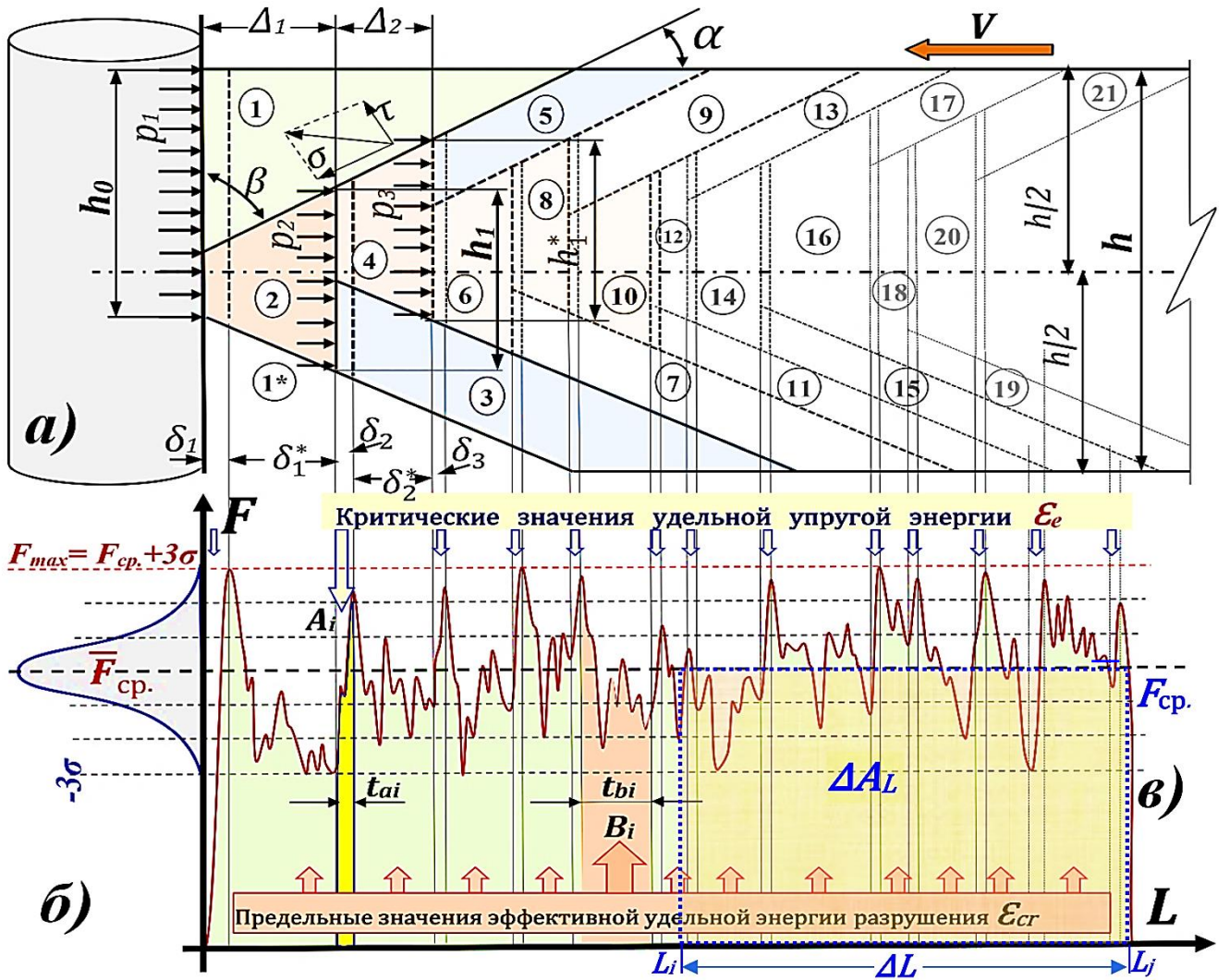


Рисунок 6.5 Схемы к расчету значений ледовой нагрузки на МЛС по цифровой записи контактной силы в процессе динамического разрушения образца льда (а, б).

Поэтому, полная запись получения среднего значения контактной силы ледового давления \bar{F}_{cp} (рисунок 6.5, в), действующей на МЛС будет иметь вид частного от деления всей затраченной работы ΔA_L на длину прорезанного опорой МЛС ледового поля $\Delta L = L_j - L_i$ и, согласно порядку разрушения участков льда в принятой модели имеет такой вид:

$$\bar{F}_{cp} = \frac{\Delta A_L}{\Delta L} = \frac{\int_{L_i}^{L_j} (\varepsilon_{cr}^* \cdot D \cdot h_1 \cdot \delta_1 \cdot \rho + \varepsilon_{cr}^{**} \cdot D \cdot h_1 \cdot \delta_1^* \cdot \rho + \varepsilon_{cr}^{***} \cdot D \cdot h_1 \cdot \Delta_1 \cdot \rho) d\Delta}{\Delta L} \quad (N); \quad (6.1)$$

где ε_{cr}^* ; ε_{cr}^{**} и ε_{cr}^{***} предельные значения удельных энергий разрушения единичного объема льда по различным механизмам его деструкции.

Формула (6.1) может быть преобразована в (6.2), где в качестве расчетного энергетического параметра прочности льда используется единое значение интегрального параметра - ε^* , что в полной мере соответствует фундаментальному *принципу минимизации энергозатрат* и связано со свойством аддитивности энергии: согласно законам термодинамики, внутренняя энергия системы будет равна сумме внутренних объемных энергий отдельных не взаимодействующих ее частей (энергий процессов), поэтому:

$$\bar{F}_{\text{ср}} = \frac{\Delta A}{\Delta L} = \frac{\varepsilon^* \cdot D \cdot h \cdot \Delta L_i \cdot \rho}{\Delta L} = \varepsilon^* \cdot D \cdot h \cdot \rho \quad (N), \quad (6.2)$$

а максимальное расчетное значение контактной силы в решаемой проблеме определяется по «правилу трех сигм» - к математическому ожиданию – среднему значению контактной силы прибавляется 3 значения среднеквадратического отклонения случайной величины F_i , определенной по кривой нормального распределения (рисунок 6.5, б):

$$F_{\text{max}} = \bar{F}_{\text{ср}} + 3\sigma. \quad (6.3)$$

Полученное таким образом **максимальное расчетное значение контактной силы является первым параметром циклической ледовой нагрузки**, значение которого надо применять в динамическом расчете МЛС.

Суммарные затраты энергии по всему спектру частот разрушения льда определяются площадью под графиком «сила-перемещение» (рисунок 6.5, б; формула (6.1)), но *затраты энергии ЛП на разрушение льда в «в циклах», ввиду разных масштабов сколов*, например, распределены очень неравномерно – пропорционально текущей амплитуде силы и ее продолжительности в каждом контактном цикле, что и характеризует *текущую мощность передачи части энергии* ЛП льду в контактной зоне и МЛС. *Затраты энергии ЛП на разрушение льда* (и отклонения опоры МЛС) могут быть описаны мощностью и частотой чередования фаз циклов разрушения/экструзии льда, а их характер описывается спектральным **распределением мощности приходящейся на единичный интервал частоты разрушения льда** (рисунок 6.5, б). Поэтому, для решения поставленной задачи в качестве расчетной частоты пиков ледовой нагрузки принята частота «несущая» максимальную суммарную мощность разрушения льда, определяемая преобразованием Фурье цифрового ряда диаграммы $F(t)$.

Третьей задачей, решенной в этой главе, является выполнение процедуры **верификации разработанного здесь метода определения расчетных параметров** циклической ледовой нагрузки по данным модельных и натуральных экспериментов по прорезанию ЛП моделями МЛС. Адекватность метода в целом обеспечена соблюдением условий подобия в *исследуемых объемах и процессах разрушения льда (в море и в лаборатории)*, доказанными в процессе его разработки тремя теоремами (согласно теории подобия): теоремами Ньютона, Бэкингема и Кирпичева - Гухмана. С учетом идентичности материала модели материалу природы, и явления, и процессы его разрушения: а) происходят **в геометрически подобных системах**, б) **подобны качественно** и в) **количественно описываются подобными уравнениями состояния**.

Кроме показанных методов выявления **качественных признаков подобия явлений** процесса разрушения больших образцов явлениям процесса разрушения натурального льда в майне моделью опоры, однозначность существования **исследуемого подобия** доказыва-

ется **верификацией** параметров гистограмм числовых рядов «Сила-время» процессов ледового воздействия **на модели сооружения**, протаскивавшихся в натурном льду Амурского залива и **разрушения больших образцов – блоков льда в лаборатории ДВФУ** (рисунок 6.3 б). Статистическая обработка числовых рядов для контактной разрушающей силы для сравниваемых способов разрушения льда *с вероятностью более 95%* описываются законом нормального распределения (*критерий Лиллиефорса $p < 0,01$*) и их **гистограммы подобны по основным параметрам – симметричности и унимодальности**.

На рисунке 6.6 показано, что как характер разрушения образца льда при его динамическом разрушении, так и массива ЛП при его прорезании опорами аналогичны, равно как **аналогичны спектральные плотности мощности энергии разрушения льда в обоих случаях, поскольку несущие частоты максимальных значений мощностей разрушения льда совпадают**. из чего следует, что **метод испытания больших образцов льда при постоянной скорости движения плиты пресса обеспечивает высокую адекватность качественных параметров процесса** испытаний образцов процессам разрушения кромки ЛП в полунатурных экспериментах.

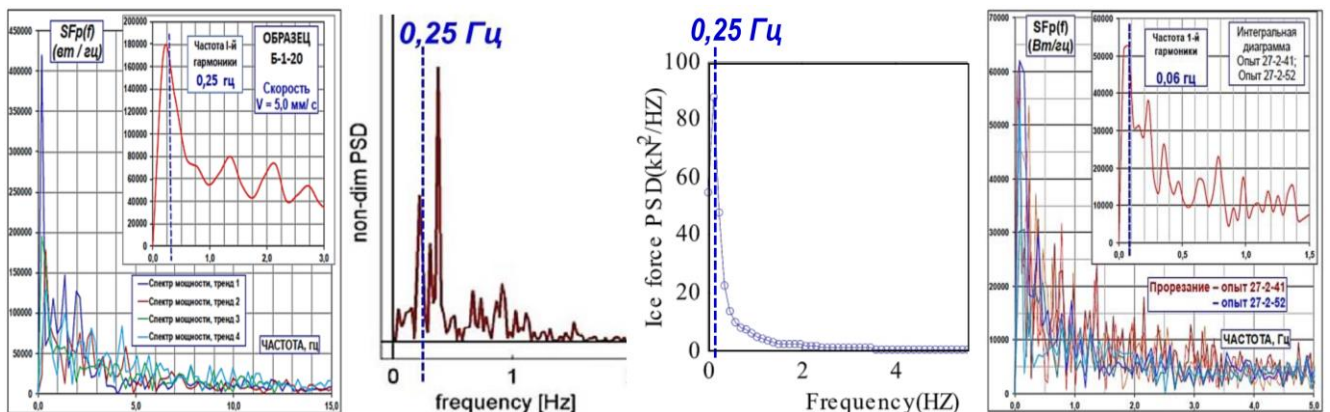


Рисунок 6.6 Распределения спектральных плотностей мощностей разрушения льда: а) – образца в опытах автора, 2017; ледовых полей: б) – на маяке в Финском заливе - по А. Gürtner и др., 2010 г.; в – заправочного буя в Бохайском заливе – по **Kärnä** и др., 2007; г) – прорезания льда Амурского залива моделью по Беккеру А.Т., 2001

Разработанный метод дает возможность получения расчетных параметров цикличности ледовой нагрузки– максимального значения силы контактного давления льда и частоты пиков ледовой нагрузки с использованием энергетического подхода к количественным описаниям процесса разрушения льда, что однозначно подтверждается удовлетворительными согласованиями частот разрушения льда и значений эффективной удельной энергии \mathcal{E}^* в лабораторных испытаниях образцов со значениями этих величин, полученными в натурных и полунатурных экспериментах (таблица 6.1).

Выполненные исследования и полученные результаты стали основой для разработки **Рекомендаций 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.

Таблица 6.1 Сравнение результатов лабораторных опытов автора с данными других исследователей, в т.ч. полученным в натуральных условиях

Авторы, источник, год	Тип сооружения, образца	D опоры (м)	H льда лп (м)	$V_{лп}$ (м/с)	T °С	Контактная сила (MN)		f_{max} $f_{ср.}$	$f_{cr.ice}$ (Гц)	ϵ^* (дж/г)
						F_{max}	$F_{ср.}$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Цуприк В.Г. 2016-18 г.г.	Цилиндрич. 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	Образцы – призмы 70x70x240 с пирамидой вверху h=5 см, натур- ный лед озера Лулео, <i>Швеция</i>			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	Маяк, <i>Балтика</i>	7,2	0,69	0,13	-7,8	3,90	2,16	1,76	0,38	0,411
Kärnä, Qu, Yue et al. 2007.	Швартовый пал <i>Бохайский залив</i>	1,5	0,3	0,2	-5,0	0,038	0,020	1,9	0,25	0,5
Kärnä, Yan, Report VTT, 2004	Маяк Norströmsgrund <i>Балтика</i>			0,13	-15,0	1,415	0,772	1,83	0,1	0,831
				0,15	-7,0	1,85	1,311	1,41	0,15	0,562
				0,18	-15,0	0,40	0,185	2,15	0,1	0,911
Беккер и др. ДВПИ, 1991	Прорезание морского льда моделями, Амурский залив			0,0128	-3,0	0,0129	0,0072	1,79	0,1	0,37
				0,0188	-2,0	0,0294	0,0178	1,65	0,1	0,25

Рекомендации, *по применению нового критерия* динамического механического разрушения льда в расчетах параметров цикличности процесса есть решение четвертой задачи, поставленной в шестой главе диссертации.

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 МЛС вертикального типа с цилиндрическими опорами 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 ставились и не прорабатывались, 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 ЛП на МЛС с вертикальными опорами.

4. Разработана концепция новой методологии расчета динамических характеристик циклической ледовой нагрузки на МЛС, основанной на описании процесса периодического разрушения льда в зоне контакта грани ЛП с поверхностью опоры сооружения.

5. Проведены исследования комплексного явления взаимодействия элементов системы «ЛП–МЛС», 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 циклическости 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 ЛП – как комплекса неодновременных и стохастических процессов развития системы трещин отрыва и сдвиговой природы, дробления и смятия обломков льда и спонтанного освобождения упругой энергии, аккумулированной в напряженном массиве ЛП.

7. Обосновано и показано применение энергетической концепции для описания циклической нагрузки от льда на МЛС 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 с помощью математических методов, основанных на законах механики, физики, термодинамики, теории упругости и др. фундаментальных наук. 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 ЛП.*

8. Показана объективная целесообразность использования параметра *плотности удельной энергии механического разрушения льда \mathcal{E}^** в расчетах характеристик циклическости динамической ледовой нагрузки *в качестве интегративного критерия* контактного динамического разрушения льда, основанного *на комплексном учете* энергозатрат всех видов разрушений в локальном объеме льда в зоне контакта ледового поля с морским сооружением *в виде эффективной удельной энергии механического разрушения льда \mathcal{E}^* .*

9. Показано, что, с учетом свойств 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 \mathcal{E}^* является регулятором периода и амплитуды колебаний МЛС, ограничивающим рост ее значений при автоколебаниях.

10. Разработан метод определения расчетных значений динамической прочности морского льда для динамических расчетов МЛС - *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 определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на морское гидротехническое сооружение*, 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 МЛС.

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 ... 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.

Научная ценность работ соискателя ученой степени состоит во введении в традиционный метод расчета статической ледовой нагрузки на МЛС на основе силовой концепции описания разрушения льда на контакте с опорами МЛС кардинально новой для данной области энергетической концепции, основанной на фундаментальных законах сохранения и термодинамики, на современных численных методах моделирования физических процессов в области проектирования ледостойких оснований морских сооружений.

По теме диссертации соискателем опубликовано **более 70 работ, в том числе:**

а) в изданиях, индексируемых в базе журналов и сборников из списка ВАК:

1. Цуприк, В. Г. Концептуальное моделирование системы обеспечения проектной надежности оснований морских ледостойких сооружений / В. Г. Цуприк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2021. – Т. 13 (6). – С. 819–831.

2. Цуприк, В. Г. Обоснование применения энергетического подхода к определению параметров циклической ледовой нагрузки на шельфовые сооружения / В. Г. Цуприк // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2021. – № 4 (49). – С. 90–105.

3. 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, Санкт-Петербург. – 2017. – Т. 284. – С. 102–117.

4. Цуприк, В. Г. О механизме генерации циклической ледовой нагрузки на шельфовые сооружения от разрушения льда (обзор) / В. Г. Цуприк // Вестник инженерной школы ДВФУ. Гидротехническое строительство. – 2017. – С. 47–63. DOI.org/10.5281/zenodo.896998. (www.dvfu.ru/en/vestnikis).

5. Цуприк, В. Г. Энергетическая концепция нормирования прочности льда для расчета ледовой нагрузки на вертикальные структуры / В. Г. Цуприк // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2016. – Т. 279. – С. 85–105.

6. 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. – С. 80–92.

7. Цуприк, В. Г. Методологический подход к анализу содержания проблемы определения надёжности морских ледостойких оснований. / В. Г. Цуприк // Архитектура и строительство Дальнего востока: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). – М.: Горная книга, 2014. – № 12. – С.168–180.

8. Цуприк, В. Г. Теоретические исследования удельной энергии механического разрушения морского льда / В. Г. Цуприк // Вестник НГУ. Серия: Математика, Механика, Информатика. Новосибирск. – 2013 – № 2. – С. 119–125.

9. Цуприк, В. Г. Кинетика и кинематика процесса воздействия ледовых полей на шельфовые сооружения / В. Г. Цуприк // Архитектура и строительство Дальнего востока: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). – М.: Горная книга, 2014. – № 12. – С. 181–189.

10. Цуприк, В. Г. Обоснование метода расчета надёжности морских сооружений с позиций расчёта конструкций по предельным состояниям. / В. Г. Цуприк // Проблемы освоения георесурсов Дальнего востока. Выпуск 5: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). – М. : Горная книга, 2014. – № 12. – С. 136–149.

11. Цуприк, В. Г. Системный подход как методология расчета надёжности морских ледостойких оснований / В.Г. Цуприк // Проблемы освоения георесурсов Дальнего востока. Выпуск 6 : Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). – М. : Горная книга, 2014. – № 12. – С. 98–113.

12. Цуприк, В. Г. Законы разрушения кромки ледового покрова при его взаимодействии с поверхностью опоры / В. Г. Цуприк // Проблемы освоения георесурсов Дальнего востока. Выпуск 6 : Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). – М. : Горная книга, 2014. – № 12. – С. 114–133.

13. Цуприк, В. Г. Влияние угла скола в исследованиях удельной энергии механического разрушения морского льда / В. Г. Цуприк // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск № 3 «Проблемы освоения георесурсов Дальнего востока». – М. : Горная книга, 2013. – С. 125–135.

14. Цуприк, В. Г. О циклическом характере процесса разрушения морского льда при его ударном испытании жесткой сферой / В. Г. Цуприк // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск «Проблемы освоения георесурсов Дальнего востока». – М. : Горная книга, 2013. – № 4. – С. 26–40.

15. Цуприк, В. Г. Методологические аспекты обоснования рисков при определении надежности сложных технических систем типа морских ледостойких оснований / В. Г. Цуприк // Вестник Дальневосточного государственного технического университета. – 2011. – №1 (6). – С. 106–126.

б) патенты:

16. Патент № 170013 Российской Федерации, 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.

17. Патент № 170014 Российской Федерации, 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.

18. Патент № 170057 Российской Федерации, 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.

19. Патент № 2640452 Российской Федерации, 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.

з) в других изданиях, индексируемых в базах WoS, Scopus:

20. Tsuprik, V. G. Substantiations use of the specific energy ice destruction for calculation the cyclic ice load parameters to sea structures / V. G. Tsuprik // IOP Conf Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 459, No 3.

21. Tsuprik, V. G. Mathematical Modelling of Ice-Structure Interaction // V. G. Tsuprik, V. G. Zanein, L. V. Kim // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol 272, № 2.

22. Tsuprik, V. G. Model of the cyclic fracture of sea ice // V. G. Tsuprik, V. G. Zanein, L. V. Kim // Procc. Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, PACOMS 2018. – 2018. – P. 568–572.

23. Tsuprik, V.G. Prediction method of ice resistance and propulsion power for polar ships / S. Ding, L. Zhou, Z. Wang, V. G. Tsuprik // J Shanghai Jiaotong University (Science). – 2020. – V. 25, No 6. – P. 739–745.

24. Tsuprik, V. G. The forming cyclic loads on the offshore structures during ice field edge fracture / V. G. Tsuprik // Magazine of Civil Engineering. – 2017. – Vol. 74, № 6. – P. 118–139.

25. Tsuprik, V. G. Studies of specific energy fracture of ice using method test samples on uniaxial compression / V. G. Tsuprik, A. T. Bekker, E. E. Pomnikov // Proc. International Offshore and Polar Engineering Conference. – 2017. – P.1319–1325.

26. 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, E. S. Ivolgin // Proc. International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC. – 2017. – 133185.

27. Bekker, A. T. Energy concept for determining Ice Strength for Calculation Ice Load on Offshore Vertical Structures / A. T. Bekker, V. G. Tsuprik // Proc. Annual Int. Ocean and Polar Engineering Conference, (ISOPE). – 2016. – P.1282–1289.

28. Tsuprik, V. G. Determination the effective part of energy indenter's that spent on destruction of ice / V. G. Tsuprik // Proc. Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions. – 2015. – P. 1–6.

29. Tsuprik, V. G. Methodology experimental determination of local ice pressures on flexible hull of platforms and ships // L. V. Kim, V. A. Kulesh, V. G. Tsuprik // Proc. International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE). – 2015. – P. 1739–1745.

30. Tsuprik, V. G. The fracture laws of ice edge in its interaction with the shaft surface of the structure / V. G. Tsuprik // Proc. International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE). – 2015. – P. 1803–1808.

31. Tsuprik, V. G. Parameter relationships of ice-structure interaction process / L. V. Kim, V. G. Tsuprik // Proc. International Offshore and Polar Engineering Conference. – 2014. – P. 1132–1134.

32. 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. International Offshore and Polar Engineering Conference. – 2013. – P. 1098–1103.

33. Tsuprik, V. G. Theoretical and experimental studies of specific energy of mechanical failure of sea ice / V. G. Tsuprik // Proc. International Offshore and Polar Engineering Conference. – 2012. – P. 1236–1242.

34. Tsuprik, V. G. Consideration of the Mode of Contact Ice Failure in Determining Ice Forces Action on Offshore Structures / V. G. Tsuprik // Proc. International Offshore and Polar Engineering Conference, (PACOMS-92). –1992. – P. 790–794.

35. Effect of Ice Impact Forces on the Supports of Structures in Estuaries and Shelf Zones. // V. Afanasyev, Y. Dolgoplov, N.G. Khrapaty, L. Shmeleva, V. Tsuprik. Proc. IAHR Symposium on Ice Problems, Lulea, Sweden. – 1978. – P. 495-464.

2) в изданиях, индексируемых в базе «ядро РИНЦ»:

36. Цуприк В.Г. Методология определения ледовой нагрузки на ледостойкие основания с использованием удельной энергии разрушения льда / В. Г. Цуприк // Материалы международной научной конференции «Полярная механика-2016» (IPMC), Владивосток. – 2016. – С. 306-320.

37. Цуприк В.Г., Занегин В.Г. Об оценке прочности льда по удельным затратам энергии на его разрушение / В. Г. Цуприк, В.Г. Занегин // Материалы международной научной конференции «Полярная механика-2016» (IPMC), Владивосток. – 2016. – С. 321-331.

38. Цуприк В.Г. Исследования удельной энергии разрушения льда методом испытания образцов на одноосное сжатие / А.К. Баенхаев, А.Т. Беккер, Е.С. Иволгин, Е.Е. Помников. В.Г. Цуприк // Материалы международной научной конференции «Полярная механика-2016» (IPMC), Владивосток. – 2016. – С. 332-346.