

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Цуприка Владимира Григорьевича** на тему «Методология определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на морские сооружения на основе энергетического подхода», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.07 – Гидротехническое строительство

Актуальность темы диссертации

Освоение нефтегазовых месторождений в Арктике сопряжено с проблемой добычи углеводородных ресурсов в районах арктических морей, покрытых льдом. Факторами, определяющими технические решения морских инженерных сооружений для обустройства месторождений, являются, в первую очередь, параметры ледового режима и ледовые силы на сооружения. Представленная диссертационная работа посвящена исследованию закономерностей формирования динамических ледовых нагрузок, вызывающих вибрацию морских ледостойких сооружений (МЛС) в процессе циклического контактного разрушения льда. Основными влияющими факторами можно назвать недостаточную изученность процесса разрушения льда как материала и механизмы формирования ледовых нагрузок и воздействий. Необходимость решения данной проблемы является актуальной, что и обосновано во введении диссертационной работы, где сформулированы цель, задачи и новизна полученных результатов, приведены данные по реализации и апробации работы. Приводится краткий анализ состояния рассматриваемой проблемы. Описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследований, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов исследований, апробация результатов, личный вклад автора, публикации и структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованных источников и приложений, содержит 341 страницу текста, 172 рисунка, 14 таблиц, список литературы из 387 источников на 20 страницах.

В **первой главе** диссертации автор создает общую концепцию исследования с привлечением резонансного явления в системе МЛС-ЛПИ; рассматривается изменение энергетического баланса системы в контактной зоне с выделением части энергии, затрачиваемой на разрушение льда как альтернативу силовому подходу. Циклические силовые воздействия на сооружение характеризуются как максимальными значениями отдельных пиков силы, так и частотой их чередования. В течение времени прорезания ледяного поля опорой сооружения создается вибрация сооружения, частота собственных колебаний которого может совпасть с частотой разрушения льда. Подобный резонанс создает условия к разрушению элементов конструкции МЛС или его сдвигу по поверхности грунта. Автором, на основе анализа общей концепции проблемы, показана невозможность применения существующих «статических» нормативных методов к расчету динамических параметров ледового давления на сооружение. Автор делает вывод, определивший подход, направление и методологию исследования, указывая, что «Решение проблемы

необходимо искать через рассмотрение изменений энергетического баланса системы ледоооружение в контактной зоне с выделением части энергии, затрачиваемой на разрушение льда как альтернативу силовому подходу».

В качестве приемлемого выхода в данном случае автор предлагает «использование критерия прочности (критерия разрушения), получаемого в условиях испытаний, которые в максимальной степени соответствуют условиям работы льда у контактной грани ледяного поля». Задача может быть решена дифференцированием уравнения энергетического баланса в системе ЛП–МЛС, описывающего условие наступления разрушения напряженного объема льда в момент времени, когда скорость диссипации энергии в нагружаемом объеме льда станет равной скорости нарастания плотности упругой энергии в этом объеме. Для получения решения этой основной задачи автор ставит задачу исследования закономерностей механизма разрушения льда на контакте с МЛС.

Во второй главе дается обзор физических свойств морского льда по результатам российских и зарубежных исследователей, проводится анализ механизмов разрушения льда при взаимодействии с различными инденторами. Автором выполнен анализ результатов всех известных экспериментальных исследований механизмов и закономерностей разрушения льда при контактном взаимодействии с моделями призматических опор сооружения как в ледовых бассейнах, так и в натуральных условиях. Проанализированы результаты исследований механизмов разрушения льда и методов получения параметров цикличности ледовой нагрузки на реальных сооружениях. Приводятся данные по влиянию на механизм развития процессов разрушения льда и на значения контактной силы давления льда следующих факторов: соотношение диаметра опоры к толщине льда, форма опоры и скорости нагружения локального объема льда в контактной зоне ЛП – МЛС.

Здесь сделаны выводы о том, что каждое нарушение сплошности массива льда в зоне его контакта с поверхностью индентора есть результат реализации накопления упругих деформаций в виде трещин, которые «разгружают» ледяной покров. Поэтому периодический сброс напряжений в зоне контакта и дальнейшее продолжение процесса загрузки ледовой плиты приводит к последовательным пикам разрушения льда. Таким образом, характер воздействия ледового поля на сооружение формируется как непрерывный стохастический процесс разрушения льда.

На основе результатов выполненного анализа реальных механизмов разрушения льда на контакте с опорой МЛС, автор в качестве *объекта исследования* принимает механизм разрушения льда, а *предметом исследования* выбирает энергетическую характеристику прочности – эффективную удельную энергию разрушения льда – ϵ_{cr} , являющаяся регулятором базовых расчетных параметров ледовой нагрузки на МЛЮ, как максимального значения ее пика, так и продолжительности цикла разрушения льда. *На основе принятой концепции автором поставлена цель – разработать научно-обоснованную методологию определения указанных расчетных параметров циклической ледовой нагрузки в системе ЛП – МЛС.*

В третьей главе выполнен системно–методологический анализ макромеханических за-

кономерностей циклического разрушения морского льда при взаимодействии с вертикальными опорами МЛС. Результат системного рассмотрения процессов взаимодействия ЛП с МЛС показал, что исследуемые явления – прорезание ледяного поля и колебания сооружения – связаны одним процессом, результатом которого является послойное циклическое разрушение льда, как не имеющее места в природе при поэлементном исследовании каждого из этих объектов (по мнению автора). Процесс разрушения льда в рассматриваемой системе является ее интегративным свойством, которое, наряду со структурой, целостностью и целью является одним из основных признаков системы. Системный подход к решению рассматриваемой проблемы позволил автору 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, работающей в сложной совокупности многих природных систем (вода, воздух, лед, сооружение, морской грунт...).

В диссертации разработана феноменологическая модель разрушения льда как полупространства из упруго–хрупкого материала, в поверхность которого внедряется индентор. Разрушение льда в предложенной модели формулируется как минимально необходимое количество упругой энергии, высвобождающейся вследствие хрупкого разрушения и являющейся постоянной величиной для этого материала.

Для дальнейшей разработки научно–обоснованной методологии определения параметров циклической ледовой нагрузки в системе ЛП –МЛС, автором принимается гипотеза, состоящая в том, что критерием разрушения льда в реальном физическом состоянии является эффективное значение критической плотности упругой внутренней энергии в структуре льда, отнесенная к единице его массы – эффективная удельная энергия механического разрушения льда.

В четвертой главе приводится описание выполненных автором физических экспериментов по определению реальных значений энергетического критерия разрушения льда – удельной энергии разрушения льда, включая спланированный полнофакторный эксперимент «падающих сфер». В результате более чем 700 опытов по сбрасыванию стальных инденторов на поверхность ледяного покрова получена зависимость исследуемой величины от условий эксперимента: массы и скорости индентора. Была выявлена сложная методологическая особенность расчета массы разрушенного льда в объеме образуемого поверхностью внедряющегося индентора, т.е. отпечатка во льду, который придает этому методу существенную трудность в его практическом использовании в полевых условиях. Это послужило поводом для поиска иного способа определения численных значений энергетического критерия разрушения льда.

Пятая глава диссертации посвящена разработке имитационной модели послойного разрушения морского льда на контакте кромки ЛП с опорой МЛС. Основой для синтеза этой расчетной базовой модели стало доказательство принятой гипотезы, описывающей нагрузки на МЛС с использованием динамического критерия разрушения льда, численные значения которо-

го следует получать экспериментально. В качестве элементов синтезируемой модели автором исследованы возможности применения известных концептуальных подходов к моделированию возникновения явления колебаний сооружения при разрушении льда. Проведенный анализ показал, что многие современные исследования направлены на разработку некоторой «универсальной» методологии составления расчетной модели циклической ледовой нагрузки на МЛС, учитывающей набор наиболее значимых расчетных параметров, «регулирующих» механизм явления разрушения морского льда в зоне контакта с МЛС. Цель таких подходов – стремление к адекватному описанию реальных процессов через выбор значений таких параметров в качестве исходных для построения их механических моделей ледовой нагрузки, которые показывают «максимальную сходимость» результатов расчетов модели и эксперимента или измеренных в натуре характерных величин процесса.

Для прототипа синтезируемой модели автор использовал «смешанную схему» моделирования процесса возникновения автоколебаний в системе ЛП–МЛС, в которую он включил все известные феноменологические процессы разрушения льда на контакте ЛП с МЛС. На рисунке 5.3.12 автор приводит графическую интерпретацию процесса возникновения колебаний МЛС, возбуждаемых циклическим разрушением льда на контакте с ЛП в процессе их взаимодействия, демонстрирующую работу разработанной им имитационной модели.

В главе 6 дано определение расчетных параметров циклической ледовой нагрузки на вертикальные МЛС с применением имитационной модели послойного разрушения льда. В модели использован энергетический критерий разрушения льда, получаемый по новому способу определения его численных значений из опытов по динамическому сжатию образцов. Показаны результаты теоретического и компьютерного моделирования развития механизма разрушения льда в зоне контакта ЛП с опорой МЛС, обосновывающие выбор формы и размера больших образцов для проведения опытов.

Далее описывается «функционирование» имитационной модели и способа фиксации всех элементов процесса циклического разрушения льда на кромке ЛП записью цифрового ряда непрерывного стохастического процесса дискретных значений контактной силы. Это позволяет применить известные статистические методы для получения «первого параметра цикличности» ледовой нагрузки на МЛС – средних и максимальных значений силы ледового давления с заданной вероятностью. Все теоретические предпосылки подтверждаются приведенными результатами экспериментов автора. Описана верификация разработанного метода определения расчетных параметров циклической ледовой нагрузки по данным модельных и натурных экспериментов по прорезанию ЛП моделями МЛС.

Второй «параметр цикличности ледовой нагрузки на МЛС» автор определяет по методу определения спектральной мощности разрушения льда – расчету «характерной частоты» актов разрушения льда, в которых расходуется большая часть приложенной к удельному объему льда

энергии. Сравнение этого параметра по записям процесса разрушения образцов льда с записями измеренных значений на реальных сооружениях показали хорошее согласие, поэтому можно считать методологию, разработанную автором, с положительным результатом.

Теоретическую значимость и научную новизну работы имеет разработанная автором *методология расчета параметров цикличности ледовой нагрузки* на конструкции МЛС от действия дрейфующего ЛП в составе:

– универсальной *математической феноменологической энергетической модели* описания комплексного явления послынного разрушения льда на контакте, описывающей сразу несколько одновременно и стохастически развивающихся в одном акте разрушения льда процессов различных типов его деформирования критическим значением одного универсального интегрального энергетического критерия разрушения \mathcal{E}^* ;

– интегрального *критерия разрушения льда* в расчетах параметров циклической ледовой нагрузки: эффективной плотности удельной упругой энергии \mathcal{E}^* , связанной с особенностями реологических свойств морского льда;

– метода *экспериментального определения* энергетического критерия динамического разрушения льда \mathcal{E}^* способом динамического сжатия высоких образцов натурального льда;

– метода *верификации* расчетной длительности цикла «нагрузки – разрушения» в испытаниях образцов льда по данным обработки записей ледовой нагрузки на реальные сооружения.

Практическая значимость исследования состоит в прикладных аспектах полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований механизма разрушения морского льда для расчетно-проектной практики: возможность выполнения расчетов динамических параметров цикличности ледовой нагрузки по новой комплексной, физически обоснованной методологии, повышающей надежность результатов расчетов ледовой нагрузки на МЛС и дополняющей нормативную методологию.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений: она обеспечена корректным использованием теоретических и экспериментальных методов обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Подтверждением достоверности исследований является удовлетворительное совпадение результатов расчетов с данными натурных наблюдений.

Основные замечания по диссертационной работе.

1. Имитационная модель циклического разрушения морского льда разработана автором диссертации для ровного ледового покрова. При воздействии ЛП с хаотическим расположением торосистых образований, что характерно для арктических морей, картина взаимодействия будет изменяться. Автор для таких условий не оговорил возможный диапазон применения этой модели и не дал рекомендаций по учету в характере ледовой нагрузки указанного явления. Почему?

2. Во второй главе подробно представлены физические свойства морского льда, в част-

ности его соленость, пористость и слоистость, а также и распределение включений в массиве ледового покрова. Влияние указанных особенностей текстуры льда не отражено в описании и формулировке предложенной автором работы имитационной модели циклического послойного разрушения льда на контакте ЛП с МЛС. Непонятно – требуют ли эти особенности учета?

3. Рассматриваемая в третьей главе концептуальная модель разрушения льда получена при условии, что «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». Вопрос: как и насколько количество и длина таких трещин влияют на адекватность предложенной автором концептуальной модели?

Пожелание по теме исследования. Автору следует уточнить его утверждение о том, что «...прорезание льда и колебания сооружения связаны одним процессом, результатом которого является послойное циклическое разрушение льда, не имеющее места в природе при поэлементном исследовании каждого из этих объектов». «Совокупность объектов ЛП – МЛС является сложной искусственной природно – технической Системой взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем и элементов» (стр. 153). Однако, имеются *данные*¹ натуральных исследований, когда в окружающей природной среде возможно появление циклических процессов, в том числе и в морском ледяном покрове. То есть, существуют не только природно-технические системы с автоколебательным режимом: протяженные разрывы в сплоченном льду являются источником крупномасштабных периодических сбросов напряжений с излучением широкого спектра упругих колебаний, дистанционно воздействующих на морское сооружение.

Общее заключение по диссертации

Тема диссертационной работы актуальна, представленные замечания не влияют на актуальность и существенную теоретическую и практическую значимость выполненной работы. Содержание диссертации изложено в большом количестве публикаций, которое соответствует требованиям ВАК. Автореферат по содержанию соответствует диссертации.

Диссертация выполнена автором самостоятельно, обладает внутренним единством изложения, представляет собой завершенную научно-квалификационную работу по определению параметров циклической ледовой нагрузки на МЛС. В целом диссертацию по постановке проблемы, решаемым задачам и совокупному результату следует оценить положительно.

Диссертация соответствует паспорту специальности и направлена на совершенствование конструкций МЛС путем разработки новых расчетов, методов проектирования, возведения и эксплуатации конструкций МЛС. Диссертация содержит решения по совершенствованию методов

¹ Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Ньюбом А.А. Автоколебания в дрейфующем ледяном покрове Северного Ледовитого океана // Океанологические исследования. — 2019. — Т. 47. — № 3. — С. 122—138. DOI: 10.29006/1564–2291.JOR–2019.47(3).11 .

физического и математического моделирования условий работы МЛС в суровых ледовых условиях, направленных на повышение их надежности, разработке новых критериев их безопасности. Рекомендации автора для дальнейшего применения результатов исследования, приведенные в приложении к диссертации, показывают, что разработанные методики расчета параметров цикличности ледовой нагрузки могут быть использованы в проектной деятельности для повышения надежности МЛС. Рекомендации также могут быть обоснованием для разработки отдельного раздела СП 38.13330.2018 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) по определению параметров циклической ледовой нагрузки на морские гидротехнические сооружения.

Таким образом, рассмотренная диссертация Цуприка В.Г. соответствует критериям, установленным в п.п. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., в ней дано решение научной проблемы, имеющей важное экономическое значение в области проектирования и строительства морских гидротехнических сооружений для северных морей. Учитывая приведенные оценки диссертации, следует считать, что ее автор Цуприк Владимир Григорьевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.07 Гидротехническое строительство.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук



Смирнов Виктор Николаевич

31.05.22

Ученая степень: доктор физико-математических наук;

Докторская диссертация: «Динамические процессы в морских льдах» защищена в 1997 г. по специальности 11.00.25 «Океанология».

Полное название организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ФГБУ «АНИИ»),

Должность: главный научный сотрудник отдела ледового режима и прогнозов;

Контактные данные: (812)337-3118; E-mail: smirnov@aari.ru

Почтовый адрес: 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38.

Тел.: (812)337-3114, факс: (812)337-3241, email: aaricoop@aari.ru.

Подпись Смирнова Виктора Николаевича удостоверяю:

Начальник отдела кадров



А.К. Грачева

31.05.22