

Гидротехническое строительство

Научная статья
УДК 539.42:551.326/620.178.7
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/90-105>

В.Г. Цуприк

ЦУПРИК ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, tsuprik.vg@dvfu.ru,
<http://orcid.org/0000-0001-9442-5568>
Политехнический институт
Дальневосточный федеральный университет
Владивосток, Россия

Обоснование энергетического подхода к определению параметров циклической ледовой нагрузки на шельфовые сооружения

Аннотация: Определение величины силового воздействия ледовых образований на морское ледостойкое основание производится по расчетной формуле, описывающей принятую модель разрушения льда. Лед в контактной зоне ледового поля с сооружением, в зависимости от его температуры и скорости взаимодействия, может разрушаться в широком диапазоне механизмов его разрушения – от вязкого до хрупкого. Здесь представлена разработка модели упруго-хрупкого разрушения льда, учитывающая разрушение кромки ледового поля всеми возможными типами трещин, делящими локальную область массива льда в зоне контакта с сооружением на клиновидные или трапециевидные фрагменты. Предложено все процессы разрушения льда, имеющие различную природу, рассматривать как единообразный, но комплексный процесс, математическое описание которого во времени можно выполнить с использованием универсального энергетического критерия разрушения. Приводятся обоснования закономерности такого подхода, основанные на феноменологическом анализе явления циклического разрушения льда в контактной зоне, на результатах численного моделирования картины развития разрушений в массиве льда у кромки ледовой плиты на контакте с опорой сооружения, а также на данных физического моделирования изучаемого процесса. В качестве универсального критерия в работе рассматривается предельное значение накопленной в единице объема льда перед сооружением потенциальной энергии упругого сжатия – удельной упругой энергии механического разрушения морского льда.

Ключевые слова: морские гидротехнические сооружения, вибрация, морской лед, разрушение льда, моделирование разрушения льда, циклическая нагрузка, энергетический подход

Для цитирования: Цуприк В.Г. Обоснование энергетического подхода к определению параметров циклической ледовой нагрузки на шельфовые сооружения // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 4(49). С. 90–105. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/90-105>

Введение

Одной из нерешенных на сегодняшний день проблем освоения месторождений нефти и газа на шельфах приполярных морей в условиях дрейфующих ледовых полей (ЛП) является **проблема вибрации морских ледостойких оснований** (МЛО). Это явление снижает надежность сооружений, имеющих колоссальную стоимость, и может привести к невозможности их нормальной эксплуатации, глобальному экологическому ущербу и даже человеческим жертвам.

Уже на первом этапе пионерных исследований проблемы, в 1960–1975-х годах, в экспериментальных исследованиях на реках, на экспериментальных морских платформах и маяках, в опытах по разрушению натурального ледового покрова, а также в ледовых лабораториях

было показано, что проявления данной проблемы имеют тесную связь с явлением циклического разрушения льда.

В поисках истинной природы возникновения вибрации в сооружениях при воздействии на них ледовых полей многими учеными в течение второй половины XX в. и начале XXI в. проводились экспериментальные исследования механизмов разрушения льда как среды, создающей силовое давление на конструкции шельфовых сооружений. Экспериментальные исследования физики и механики разрушения натурального льда наряду с теоретическими исследованиями ведутся постоянно. При этом проводятся работы по изучению строения льда, реологических процессов, сопровождающих его разрушение, развития трещин в образцах и в массиве льда и т.д. Исследуются как разрушение образцов разной формы под действием статической и динамической нагрузки, так и процессы разрушения льда при внедрении инденторов различной формы в поверхность ледового массива, в том числе в торцевую грань ледовой плиты.

Данными большого числа экспериментальных исследований разрушений льда при взаимодействии с сооружением установлено, что источником циклической ледовой нагрузки на сооружение являются резкие периодические сбросы силы упругого сжатия локального объема льда в массиве торцевой грани ЛП на контакте с МЛЮ в результате хрупкого разрушения льда [9, 16–18, 20, 21, 24, 33, 35, 38]. Данный процесс описывается параметрами реализующегося в нем специфического *механизма разрушения льда*, имеющего комплексный и объемный характер и являющегося регулятором частоты и амплитуды циклов нагрузки на сооружение [39]. Несколько авторов процесс взаимодействия ЛП с МЛЮ связывают с непрерывным дроблением льда на опоре, но другие говорят о том, что дробление не является непрерывным, и правильнее называть этот процесс *«послойным», циклически повторяющимся разрушением льда с непрерывной очисткой зоны контакта* от продуктов разрушения [4, 8, 36]. Дополнительно к этому результаты многих исследований показывают, что разрушение льда в течение одного цикла происходит *в две основные стадии*, каждая из которых также состоит из самостоятельных непрерывно протекающих процессов [26, 28, 31, 33, 35, 37]. Схемы «полного цикла» чередования сколов с дроблением и экструзией продуктов разрушения льда из зоны контакта, при симметричном и несимметричном механизмах разрушения как обобщение большинства исследований показаны в работах [10, 15, 19, 24, 26, 27, 34, 37, 39–41]. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований механизма контактного разрушения льда выполнен в работе [38], где приводится подробное описание видов разрушения льда и последовательности всех механических процессов, развивающихся во времени и составляющих в совокупности единый комплексный процесс внедрения опоры сооружения в ровную ледовую плиту.

Авторы представленных выше исследований приходят к общему выводу, что источником энергии, обеспечивающей механический процесс разрушения льда, является *часть энергии движения ледового поля*, сконцентрированная в зоне контакта его торцевой грани с поверхностью опоры сооружения. Эта доля энергии *затрачивается на весь комплекс процессов*, то есть на развитие систем вертикальных и горизонтальных трещин, трещин сдвига, на смятие льда и выдавливание его крошки за пределы контакта и пр. Эта же энергия, за исключением потерь, *передается и опоре сооружения*, отклоняя ее от положения равновесия и оказывая локальное силовое воздействие на ее конструктивные элементы. Но, несмотря на общее понимание энергетической сущности рассматриваемых явлений, в качестве базовой концепции для описания предельных состояний льда на поверхности контакта с сооружением вместо описания динамических параметров развития напряженного состояния массива льда в области контакта применяется статический *силовой подход*, не позволяющий корректно применять законы сохранения [6, 23]. Причиной этого, по нашему мнению, является традиционное понимание и использование опыта проектирования в речном мостостроении, а также «наработанный» в проектной практике метод расчёта сооружений по предельным состояниям конструкционного материала, базирующийся на силовом подходе к расчетам предельных напряжений в плоских сечениях элемента конструкции, с одной стороны, и практическая неразработанность энергетического подхода к получению параметров циклического процесса разрушения льда,

адекватно описывающих процесс разрушения морского льда во времени с учетом его феноменологической структуры и физического состояния – с другой.

Поэтому цель данной статьи – применить энергетический подход к разработке модели контактного взаимодействия ЛП с МЛЮ как единственный вариант возможности комплексного учета параметров всех процессов, протекающих параллельно-последовательно для адекватного описания данного явления математической моделью. Ниже даются критический анализ работ по моделированию изучаемого явления и изложение поэтапной разработки энергетической модели: информационной модели развития процесса контактного разрушения льда, ее численной верификации и валидации по данным физического моделирования; анализа процесса разрушения льда с учетом его реологических особенностей и физического состояния; энергетического критерия разрушения льда. Некоторые этапы исследования подробно описаны в работах, опубликованных ранее [11, 38].

Ретроспектива моделирования взаимодействия ЛП с МЛЮ

Учитывая, что максимумы пиков ледовой нагрузки на МЛЮ являются значениями силы его давления на массив льда, вызывающими его разрушение, для *прогнозирования надежности* МЛЮ требуется получение качественных и количественных характеристик этого явления, для чего необходимо построить *модель разрушения льда*. Основной целью разработки моделей взаимодействия льда с сооружением является адекватная реальному процессу формула расчета ледовой нагрузки для обеспечения надежного прогнозирования функционирования такого сложного объекта, как МЛЮ в условиях его эксплуатации. Поэтому *вторым важным направлением* на пути решения рассматриваемой проблемы, в полном соответствии с логикой нормативного (проектного) моделирования, уже полвека назад стало формироваться направление разработки *математических моделей феноменологических процессов разрушения льда* в натуральных условиях динамического контакта.

Основная часть разработанных моделей – это «традиционные» математические модели реального процесса взаимодействия ЛП с МЛЮ. Они разрабатывались в последние десятилетия в попытках найти модель возбуждения колебаний опор под напором ледовых полей для количественного описания именно «*процесса взаимодействия*» ЛП с МЛЮ его основными *динамическими параметрами*: пиковым значением ледовой силы и ее периода и их зависимостей от факторов процесса («функциональные модели»). Основой для разработок некоторой части такого рода моделей (аналитических описаний колебательного процесса в системе ЛП – МЛЮ) стали данные многолетних экспериментальных наблюдений. Многие исследователи описывают воздействие ледовой нагрузки на сооружение, используя в правой части уравнения движения сооружения *запись контактной силы* в функции времени или глубины внедрения опоры МЛЮ в ЛП [4, 15, 18, 27, 29, 34]. С использованием этих данных часто выполняется не полная валидация «работоспособности» таких моделей, а только сравнение общего вида кривых: $PM(t)$, полученной в результате реализации численного кода модели, с кривой $PN(t)$ из базы результатов натурного либо лабораторного эксперимента [35]. Чаще сравниваются среднестатистические значения параметров процесса, иногда – характеристик спектров мощности разрушения льда или динамики перемещений модели. Результаты таких сравнений не говорят о том, что при изменении кинетических характеристик задачи или жесткостных параметров льда и опоры сооружения такие параметры безусловно сохраняют физические закономерности их формирования.

Но разработкам моделей *процесса взаимодействия* предшествовали исследования по разработке моделей для количественного описания явления *контактного разрушения льда* как материала. Основным элементом таких моделей является *критерий разрушения льда*, который затем, по логике процесса, должен использоваться в модели «*процесса взаимодействия*» в качестве критического значения прочности (трещиностойкости) материала, т.е. в качестве «спускового механизма» для начала развития разрушения в напряженном объеме льда. Ранее,

до появления концепции разрушения материала как явления развития трещины, в исследованиях льда интенсивно использовались поверхности текучести теории упругости континуума, которые теперь «представляют только исторический интерес» [30].

Процедура экспериментального получения *характеристик поведения льда (конститутивного поведения)*, является относительно точной, но сложной, трудоемкой и часто дорогостоящей или даже недоступной на ранних стадиях проектирования. В то же время в процессе воздействия льда на основание МЛЮ все свойства морского льда, определяемые его структурой и текстурой, проявляются в большей или меньшей степени *аналогично его механическому поведению* (упругость, податливость, пластическая деформация, индуцированная деформация, анизотропия, петли гистерезиса при циклическом нагружении, повреждение монотонным нагружением или усталостью и рост трещин при статических или динамических нагрузках). Поэтому идея о прогнозировании разрушения льда как материала в основном эквивалентна задаче получения правильных конститутивных соотношений между указанными свойствами льда в виде уравнения – конститутивной модели [14, 32]. Предсказания поведения льда, особенно при сложных и динамических нагружениях, были реализованы в виде разрабатываемых *конститутивных моделей для льда* [4, 20, 22], а также в моделях, разработанных для материалов, имеющих схожее строение и реологию [31, 32].

В настоящее время известны модели взаимодействия ледовых полей с сооружениями как при медленных, так и при скоростных подвижках, а именно: модели непрерывного разрушения с экструзией при мокром трении [4, 7, 8, 36] и модели послойного разрушения льда [11, 26, 27]; динамические упруго-хрупкие модели, основанные на законе Гука, наряду с моделями, учитывающими нелинейный характер конститутивных соотношений [13]; модели скальываемых клиньев [16–18, 25, 34, 37]; вероятностные механические модели; модели периодического дробления со сколами; модели с «отрицательным демпфированием» [5]; модели с самостоятельным элементом – механизмом разрушения льда [26, 27, 36]; деформационные модели, например модель относительного смещения (модель сухого трения); модели с переменной площадью контакта и большой площадью контакта; стохастические [16, 18] и спектральные модели; модели «трещины–крыла» 2D [20] и 3D [31], а также модели, использующие метод вихрь-индуцированной вибрации (VIV) и уравнение Ван Дер Поля; импульсная модель и другие виды моделей [39–41].

Как следует уже из названий моделей, в числе других предлагаются аналитические модели, основанные на отвлеченных от реального явления разрушения льда признаках, лишь аналогичных параметрам контактного взаимодействия ЛП с МЛЮ, но не имеющих ничего общего с физикой и механикой разрушения природного льда. Но именно физико-механические параметры явления разрушения льда обеспечивают феноменологию моделируемых процессов и являются основными *параметрами* модели этого процесса. К тому же большая часть рассмотренных моделей – это *неполные функциональные модели*, в которых не рассматривается процесс разрушения льда как материала с очень специфическими свойствами и материальной основы модели вообще, моделируется только процесс взаимодействия ЛП с МЛЮ. Часть предлагавшихся моделей авторами экспериментально не валидировалась, а решения по другим моделям верифицировались только численными решениями по методу конечных элементов (МКЭ) [39–41], т.е. они имеют имитационный статус, как правило, *с учетом физико-механических параметров льда, но без привязки к физическим процессам* его разрушения.

Часто в исследованиях многих других сплошных сред выбор критерия их разрушения диктуется удобством расчёта вычисляемых величин и доступностью экспериментального определения разрушающего значения критериальной величины [3]. Возможно, именно исходя из доступности традиционного метода экспериментального определения предела прочности льда, рассчитываемого на основе *прочности* испытываемых на свободное сжатие *небольших образцов*, критериями, характеризующими напряженное состояние льда как критическое, *практически всегда* принимаются силовые параметры: давление, комбинация напряжений, коэффициент интенсивности напряжений и пр., которыми руководствовались большинство исследователей, разрабатывавших модели взаимодействия льда на опоры сооружений. Обзор

таких критериев приводится, например, в работе [30], но в то же время известно [10, 11, 14], что критерии разрушения, основанные исключительно на напряжениях, не могут охватить различие между упругими и пластическими деформациями, поскольку для напряжений не существует «упругого» или «пластического» различия.

Представленное здесь многообразие подходов к выбору моделей разрушения льда, их концепций и типов порождает вопрос о необходимости и целесообразности этой деятельности в отрыве от собственно физики и механики изучаемого процесса. По сути заданного вопроса и ранее публиковались аналогичные сомнения и серьезная критика в адрес разработчиков многочисленных сложных и не коррелирующих между собой конститутивных моделей разрушения кристаллических и гранулированных материалов типа льда. Так, С.G. Daley, один из ведущих экспертов в области моделирования контактного разрушения льда, в своей монографии в 2017 году так охарактеризовал ситуацию с моделированием поведения льда [19, с. 1/1]: «Модели механики сплошной среды, какими бы гладкими они ни были, никогда по-настоящему не объясняли прерывистый беспорядок, который представляет собой разрушенный лед. У нас есть модели, даже *некоторые хорошие*. Просто у нас *слишком много разных моделей*».

В подробном анализе современной ситуации конститутивного моделирования D. Kolymbas [32] также охарактеризовал ее большим разнообразием очень сложных и трудноразрешимых математических моделей, отметив, что основным недостатком в области конститутивного моделирования является то, что каждый исследователь (или группа исследователей) разрабатывает свою собственную конститутивную модель. Эта модель в большинстве случаев очень сложна и, следовательно, «неперемещаемая», то есть другой исследователь не может с ней работать. Все это препятствует не только применению этих моделей к практическим задачам, но и научному прогрессу, поскольку растущая путаница из-за того, что различные исследовательские группы действуют, не обращая внимания друг на друга, препятствует сопоставлению и конкуренции различных подходов. D. Kolymbas [32] высказал аргументированное мнение о том, что, «...возможно, что имеющиеся в настоящее время конститутивные модели – это не совсем то, что нужно инженерной практике и ...их следует рассматривать скорее как *академическое упражнение?*» [32, с. 12]. В связи со сложностями конститутивного моделирования комплексного нестационарного процесса разрушения льда в текущем периоде в проектной практике в нормативных документах приняты только три условные модели (рис. 1), которые основаны на некоторых соотношениях параметров, описывающих не реальный процесс формирования явления контактного разрушения льда, а сопутствующие ему процессы или их интегральный эффект в виде: констатации предела временной прочности малого образца льда (модель К.Н. Коржавина в СП 38.13330.2018 [6]); расчета максимального сопротивления льда смятию продуктов его разрушения и их экструзии из зоны контакта (гидродинамические модели Курдюмова и Хейсина [4] и Апполонова и Платонова [1] в Правилах регистра морского судоходства); определения расчетного контактного давления по геометрическим параметрам задачи (модель Pressure–Area: «P–A» в международном стандарте ISO/FDIS 19906 [23]).

Помимо реологической модели льда, требование адекватности нормативной (проектной) модели включает также *модель трещины* [20, 29], дающую представление о ее форме и структуре ее концевой области, а также введение в модель дополнительного параметра к традиционным механическим постоянным, используемым в теории упругости – критерия разрушения, представляющего собой условие начала роста трещины [3, 12]. В 1987 г. S.D. Hallam с соавторами [20] опубликовал разработанный для льда *макроскопический критерий разрушения*, основанный на концепции механики разрушения – развития растяжения в кончиках-«крыльях» наклонной трещины (или малого дефекта) при взаимном скольжении или отдалении ее берегов в условиях сжатия или растяжения. С использованием данного критерия был разработан ряд моделей разрушения грани ледового массива трещинами сдвига при сжатии [18, 31, 34]. Результатами разработки таких моделей стали *параметры цикла разрушения льда*, которые вводятся в расчеты модели «процесса взаимодействия» ЛП с МЛЮ.

<p>СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения, 2019.</p>	<p>Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской Регистр судоходства, 2019.</p>	<p>ISO/FDIS 19906. Petroleum and natural gas industries: Arctic offshore structures: ISO 19906: 2019.</p>
<p>Модель смятия льда <i>Комаровский А.Н.;</i> <i>Коржавин К.Н.</i> 1932 г.– 1982 г.</p>	<p>Модель выжимаемого слоя <i>Хейсин Д.Е.; Курдюмов В.А.;</i> <i>Апполонов Е.М.; Платонов В.В.</i> 1973 г. (ГДМ) и 2002 г. (МГДМ).</p>	<p>Модель соотношения Давление / Площадь (P/A) <i>Sanderson J.O.</i> 1988 г.</p>
<p>МЕХАНИЧЕСКАЯ</p>	<p>ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ</p>	<p>СТАТИСТИЧЕСКАЯ</p>
<p>ПРОЦЕСС НЕПРЕРЫВЕН. Лед разрушается одновременно по всей номинальной расчетной площади равномерно на блоки, дробится и сминается</p>	<p>ПРОЦЕСС НЕПРЕРЫВЕН. Разрушение Неравномерное и НЕ одновременное – лед сначала дробится в центре контакта, затем крошка выжимается на периферию</p>	<p>ПРОЦЕСС НЕПРЕРЫВЕН. Разрушение Неравномерное и НЕ одновременное – лед разрушается в локальных Зонах Высокого Давления (HPZ), «сканирующих» всю площадь</p>
<p>НЕ плотный контакт с целиком льда из-за его неровностей, вводится коэфф-ты формы опоры и плотности контакта: <i>m; k</i></p>	<p>Плотный контакт с прослойкой из смятого льда, но его НЕТ с «целиком» льда (ГДМ) или есть контакт еще и в центре зоны (МГДМ)</p>	<p>Не плотный контакт, по площади, но плотный на отдельных участках в виде фигуры или ЛИНИИ – как концентрация зон HPZ</p>
<p>Сила определяется произведением значений площади контакта A (с <i>m</i> и <i>k</i>) и прочности льда $R_c = K \cdot \sigma_{сж}$; $F_k = m \cdot k \cdot A \cdot K \cdot \sigma_{сж}$</p>	<p>Погонная нагрузка есть сумма ДАВЛЕНИЙ для выжимания крошки льда и для прямого дробления льда $p_k = q_{ex} + q_{\sigma}$ $p_k = q_0(A, V, h) + A \cdot 3 \cdot \sigma_{сж}$</p>	<p>Контактная сила определяется по статистической зависимости $p(F) = p_0(\sigma_{сж}) \cdot (A / A_0)^{-a}$; $p_k = 7,40 A^{-0,7}$ при $0,1 < A < 29 \text{ м}^2$ (Medl+2SD)</p>

Рис. 1. Типы моделей разрушения льда, применяемые в нормативных документах для определения ледовых нагрузок на морские объекты

Моделирование механизма разрушения морского льда

Требования к модели и критерию разрушения льда. Рассматриваемая здесь задача определения ледовой нагрузки на опоры морских ледостойких оснований сооружений имеет своей целью получение максимальной расчетной нагрузки от разрушения льда в условиях реальных скоростей дрейфа ледовых полей с высокой прочностью льда. В настоящем исследовании разработка *модели разрушения льда*, в которой «назначается» и верифицируется критерий его разрушения, в соответствии с логикой нормативного инженерного проектирования МЛО, будет предшествовать разработке *модели процесса взаимодействия*. Поэтому, как в любой динамической модели разрушения материала, в данной постановке задачи необходимо определить два основных параметра процесса перехода льда из неразрушенного состояния в разрушенное: предельное пиковое значение параметра сопротивления льда разрушению ϵ_{cr} и период появления этих пиковых значений T_{cr} .

В данной динамической задаче нагружения массива льда жесткой поверхностью опоры сооружения ее постановка обуславливает необходимость разработки *реологической модели* конститутивного поведения льда, где полученный критерий описывается *одним из параметров* напряженно-деформированного состояния льда и его критическое значение *указывает на начало процесса разрушения* в виде появления магистральной трещины или сети микротрещин в объеме льда. То есть критерий разрушения льда в процессе непрерывного воздействия ЛП на опору МЛО должен быть *регулятором цикла разрушения льда*. Это накладывает *требование к критерию разрушения*: по своей природе он должен соответствовать виду (механизму) его разрушения в модели взаимодействия, что не удастся корректно выполнить с использованием силового подхода. Связано это с законом сохранения энергии в напряженном объеме: лед разрушается, поскольку он более не может получать и «размещать» в элементах и связях своей структуры упругую энергию деформации от внешнего источника воздействия в виде образования новых пластических деформаций в кристаллах и на их границах, упругого изменения конфигурации внутренних поверхностей, поэтому в структуре инициируется рост новых поверхностей – трещин для достижения равновесия в конечном объеме тела.

Разработка информационных моделей механизма разрушения льда

К сожалению, рассмотренные модели в основном являются только фрагментами системного моделирования комплексного явления взаимодействия дрейфующего ледового поля с опорами ледостойких сооружений, которое должно рассматривать реальную ситуацию взаимодействия всего комплекса объектов и возникающих явлений. В то же время результаты исследований множества моделей различного типа позволяют составить достаточно четкое консолидированное представление об изучаемом явлении, но не дают оснований для составления единой модели, основанной на системном подходе к его изучению. Поэтому для достижения такой цели необходимо *следовать логике системного моделирования* в единой парадигме: от дескриптивной и компьютерной информационных моделей с описанием картины разрушения льда и поведения сооружения к имитационным численным моделям процессов протекания явлений во времени на основе результатов материального физического моделирования с разномасштабными моделями, с их валидацией по результатам физического моделирования и по натурным измерениям.

На первом этапе исследования процесса взаимодействия дрейфующего ЛП с опорами МЛЮ в качестве характерных и существенных с точки зрения целей проводимого исследования важно *детально рассмотреть* типы трещин, локации, механику и порядок их образования и роста как функционирующий *механизм разрушения льда*. Для составления такой качественной информационной модели на системном уровне воспользуемся всем арсеналом результатов исследований, накопленных как в области ледоведения и ледотехники, так и в теории упругости, термодинамике и механике разрушения. Теоретические и экспериментальные исследования процесса разрушения льда на поверхности внедряющихся в него инденторов создали предпосылки для разработки *дескриптивной феноменологической модели* контактного разрушения льда и *компьютерной информационной модели* исследуемого процесса.

Дескриптивная феноменологическая модель цикла разрушения льда индентором

Результаты анализа данных приведенных выше исследований по характеру разрушения естественных и модельных ледовых плит как в горизонтальной плоскости, так и в вертикальном срезе торцевой поверхности плиты при вдавливании моделей и при прорезании опорами МЛЮ ледовых полей послужили основой для феноменологического описания явления контактного разрушения льда для случая внедрения цилиндра в вертикальную торцевую грань ледового поля как теоретической модели. Эксперименты по вдавливанию (сбросу) инденторов с рабочей площадью сферической поверхности внедрения от 100 мм^2 до $3,0 \text{ м}^2$ в поверхность ледового массива или образца льда [1, 2, 4, 7, 8], показали полное соответствие картины и параметров разрушения льда теоретическому анализу задачи, вытекающему из теории Герца (рис. 2). Рассмотрим этот феномен по аналогии с задачей динамического внедрения жесткой сферы в хрупкое полупространство на примере задачи Герца для камня [12].

При разработке данной модели прежде всего был рассмотрен начальный – упругий этап нагружения льда жестким индентором, полагая, что при достижении предельного упругого состояния в ограниченной зоне контакта ЛП с МЛЮ в элементарных объемах имеющего кристаллическую структуру льда должны проявиться видимые признаки явления хрупкого разрушения – трещины.

Согласно решению Герца, напряжения во всем полупространстве под поверхностью тела-индентора будут сжимающими, за исключением областей *A* (рис. 2) вблизи свободной поверхности льда и области *B*, расположенной под площадкой контакта на глубине $0,7-0,9$ ее размера «*a*» [12]. Напряженное состояние в каждой из этих областей будет обуславливать развитие трещин и собственно разрушения. В соответствии с экспериментальными наблюдениями [2, 10] процесс разрушения можно представить в виде схемы (рис. 2).

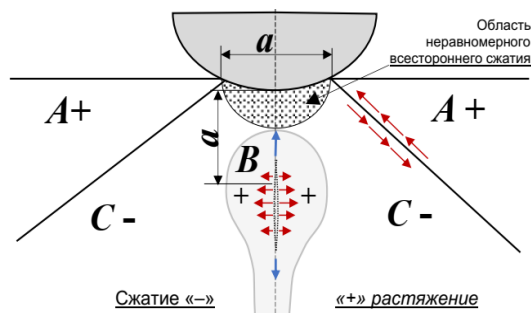


Рис. 2. Картина напряженного состояния массива льда в зоне контакта с индентором

В начале контакта его площадь увеличивается с ростом силы P ударяющего тела и все величины можно найти из решения задачи упругого взаимодействия. Но как только растягивающие напряжения σ_r в области A достигнут прочности материала на разрыв, по контуру площадки будут поочередно появляться неглубокие кольцевые трещины, поочередно поглощаемые зоной разрушения при продвижении поверхности контакта вниз. По природе эти трещины – трещины продольного сдвига, «отрывающие» сжимаемую силой давления тела центральную часть массива под площадкой контакта от кольцевой консоли $A+$, являющейся продолжением неподвижного массива полупространства льда (см. рис. 2). Края областей $A+$ под телом вблизи кругового контура контакта постоянно обламываются до плоскости верхней конусной трещины, и почти вся сила P начинает действовать на характерную площадку контакта, ограниченную сформировавшейся магистральной трещиной конической формы. Быстрый по времени и значительный по продвижению вглубь массива рост этой трещины ведет к обособлению объема сжатия в виде усеченного конуса под контактной площадкой.

Впоследствии процесс развивается так, как если бы воздействующая поверхность давила только на фиксированную площадку контакта размером a . Кроме того, здесь следует учесть, что приращение длины конической трещины вглубь полупространства на этом этапе резко уменьшается из-за быстро растущего вниз объема внутри раскрывающегося конуса. Дальнейшее увеличение силы давления сферы вызовет быстрый рост осевых трещин нормального отрыва в области растягивающих напряжений $B+$ и в области растягивающих напряжений $A+$ при изгибе круговой консоли [12], образующихся за счет последовательного воздействия вертикальной составляющей давления от части силы P , приходящейся на обламывающуюся кромку области $+A$ (см. рис. 2). Горизонтальная составляющая этого давления на кромку области $A+$ вызывает ее скол от тела в стороны, то есть к свободной поверхности полупространства, поэтому площадь контакта с кромкой области $A+$ нарушается и на центральной площадке давление увеличивается.

В таких условиях контактного разрушения максимальные сжимающие напряжения под индентором иногда на порядок превышают характерную прочность материала на одноосное сжатие [7, 12]. Чем больше уровень сжимающих нагрузок, создаваемых внедряющимся телом, тем большее число начальных трещин развивается дополнительно. Таким образом, материал в зоне, непосредственно прилегающей к площадке контакта, дробится множеством различно направленных трещин, в результате чего заключенные между ними отдельные «кубики» в свою очередь дробятся («сминаются»), крошка льда выдавливается в стороны от центра на свободную поверхность и тело продвигается вперед, зажимая под своей поверхностью прослойку из сильно уплотненной смерзшейся крошки, прочность на сжатие в ней может превышать 100 кг/см^2 [9, 12]. На этом первый цикл разрушения слоя льда перед внедряющейся поверхностью сферы заканчивается.

Результат разработки теоретической феноменологической модели локального разрушения ледового поля на контакте с опорой характеризуется в основном процессами трещинообразования и дробления-смятия-экструзии [38]. При этом, как было здесь показано, процессы дробления массива и верхних частей блоков льда между радиальными трещинами,

смятие осколков льда в крошку, выдавливание всех продуктов разрушения на периферию и т.д. происходят в соответствии с эмпирическим законом Герстнера одновременно на всем временном отрезке. Таким образом, в приложении к процессам разрушения льда перед цилиндрической опорой МЛО, внедряющейся в ЛП, картина разрушений должна будет характеризоваться следующими зонами (рис. 3, e): зоной больших радиальных трещин (1), зоной сплошной трещиноватости (2) и зоной сплошного смятия и экструзии крошки льда из зоны контакта (3).

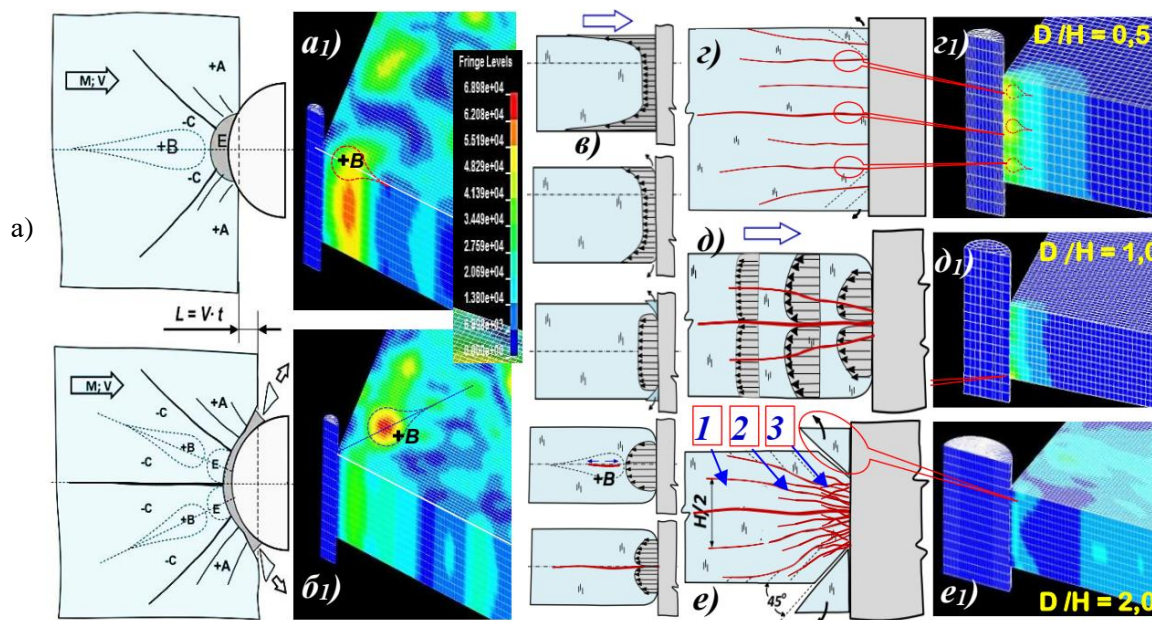


Рис. 3. Результаты теоретического и экспериментального численного исследования распределения напряжений на контакте грани ЛП с опорой МЛО

б) **Компьютерная имитационно-информационная модель картины разрушения льда**

С учетом установленной при разработке дескриптивной модели сложности реального процесса разрушения льда в рассматриваемой природно-техногенной *системе ЛП–МЛО* для выявления его деталей и составляющих его subprocesses было выполнено компьютерное имитационное моделирование изменения напряженно-деформированного состояния массива льда в зоне контакта края ледовой плиты с поверхностью цилиндрической опоры сооружения. Целью проведенного компьютерного моделирования процесса взаимодействия элементов системы в такой постановке задачи был *сравнительный качественный анализ* полученной картины, параметров моделируемого процесса, явлений трещинообразования и результатов разработки дескриптивной модели изучаемого процесса на основе анализа массива экспериментальных данных и, при необходимости, последующее уточнение дескриптивной модели. Поэтому выполненное моделирование носит качественный информационный характер.

Задача имитационного компьютерного моделирования решена с использованием МКЭ в программе LS-Dyna в пакете ANSYS путем создания численных 2D и 3D моделей развития явлений взаимодействия торца ледяного поля с вертикальной цилиндрической опорой МЛО. В постановке задачи была принята частичная идеализация свойств структурных элементов системы ЛП–МЛО: лед как материал ледовой плиты моделировался континуальной средой с упругопластическими уравнениями состояния; скорость ЛП принята постоянной; цилиндрическая опора сооружения принята неподвижной, имеющей жесткую поверхность.

Для определения чувствительности выбранной имитационной модели к неопределенности исходных данных проводились расчеты для параметров, которые являются в реальном мире не детерминистическими, а стохастическими величинами. Прежде всего, в качестве *определяющего критерия* рассматривалось отношение геометрических размеров диаметра

опоры сооружения и толщины льда, а также «неопределяющего» критерия – жесткости льда, описываемой значениями модуля упругости и прочности. Этот критерий варьировал в двух уровнях, условно названных как «слабый» (теплый) и «прочный» (жесткий) лед. Поскольку в расчетном случае следует принимать прочный лед, вариант расчета для «слабого» льда рассматривался исключительно для методологического анализа и сравнения размеров напряженных объемов и времени добегающей волны напряжений. На рис. 3 показаны отдельные примеры полученных методом численного моделирования картин напряженно деформированного состояния массива льда в торцевой грани ледовой плиты в зоне ее контакта с цилиндрической опорой сооружения.

Результаты имитационного моделирования и обсуждение

Результаты имитационного компьютерного моделирования *полностью подтверждают* основные положения представленной теоретической дескриптивной феноменологической модели разрушения торцевой грани ледового поля на контакте с цилиндрической опорой сооружения: *типы и порядок возникновения и развития* основных вертикальных трещин (рис. 3, *а, а₁, б, б₁*); горизонтальных трещин в толщине ледяного поля (рис. 3, *г, г₁, д, д₁, е, е₁*), а также трещин сдвига (скола) в зоне контакта с опорой (*е, е₁*). Наложение "теоретических" картин роста трещин в соответствующих областях массива льда в зонах концентрации растягивающих напряжений (области +А и +В) и напряжений, возникающих под действием давления в объемах сжатия (области –С и –Е) на картину распределения напряжений, полученную численным методом, показывает их полное совпадение, что говорит об уникальности картин разрушения льда.

Таким образом, на текущем этапе исследования проблемы представленная в этой работе дескриптивная феноменологическая модель получила качественную верификацию с помощью компьютерного эксперимента. Описанные явления полностью согласуются с результатами исследований по внедрению моделей цилиндрической опоры в край ледового поля [9, 15–17, 21, 34, 37].

Полученные экспериментальные данные позволили выявить новый научный результат: известный по множеству исследований «эффект стеснения» (учитываемый в формуле расчета ледовой нагрузки коэффициентом «смятия» впервые на основании обнаружения «эффекта обоймы» по результатам простейших опытов введен в практику нормирования расчетов К.Н. Коржавиным в 1960-х годах), на самом деле должен учитываться только в том случае, если процесс прорезания ледового поля опорой будет стабильно происходить по механизму разрушения льда сжатием/смятием при «сложном напряженном состоянии» (рис. 4, *а*) в его торцевой грани. Это возможно при непрочном льде, узкой опоре и относительно высокой скорости движения ледового поля. Но с увеличением соотношения D/h более значения 1,0–1,5 в механизме разрушения льда начинается «физический переход» к формированию плоского напряженного состояния и в плоских сечениях плиты льда перед широкой опорой будет превалировать сдвиговый характер разрушений у свободных нижней и верхней граней ледовой плиты (рис. 4, *б, в*).

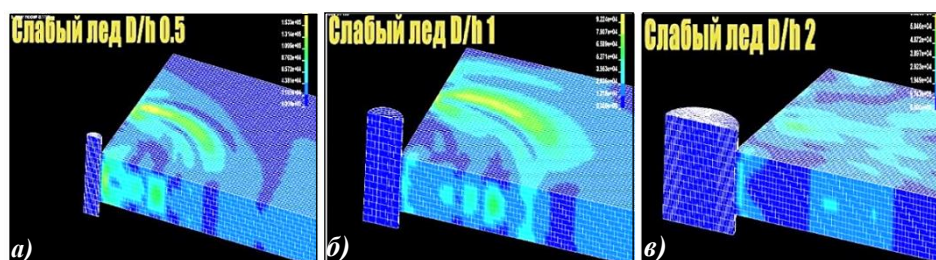


Рис. 4. Изменение вида объемного распределения энергии в торцевой грани ледовой плиты, определяющего тип разрушения льда от сплошного смятия в условиях сложного напряженного состояния (*а*) до разрушения льда по механизму «сдвига клиньев» в условиях плоского напряженного состояния плиты (*в*)

Верификация информационных моделей по данным физического моделирования

Подробное описание подготовки, методов и результатов физического моделирования, выполненного в рамках данного исследовательского проекта, опубликовано в работах [2, 9]. Здесь представлено обобщение основных результатов физического моделирования внедрения сферического индентора в поверхность полупространства из морского льда и внедрения модели цилиндрической опоры сооружения в торцевую грань ледового поля. Изучение *картины контактного разрушения морского льда* по результатам экспериментов показало, что при внедрении жесткой сферы в поверхность ледяного покрова лед может проявлять различные свойства в зависимости от его температуры (рис. 5).

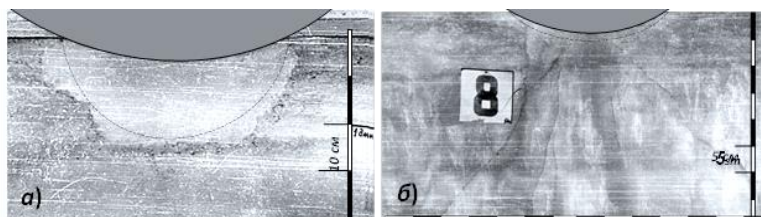


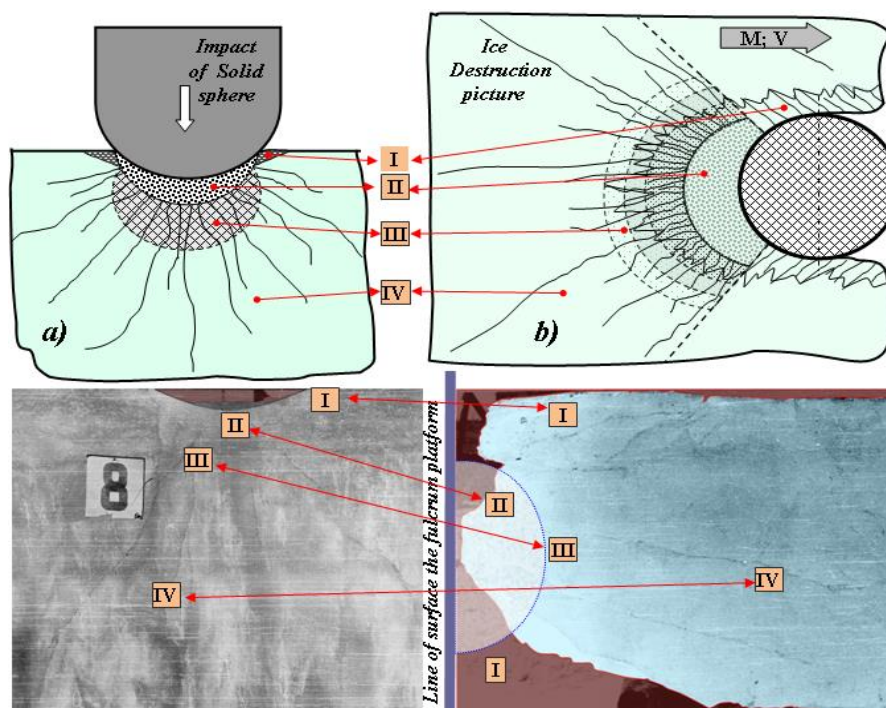
Рис. 5. Варианты механизмов диссипации энергии удара жесткой сферы массой $M = 163$ кг и радиусом $R = 28,3$ см, сброшенной с высоты 1,2 (а) и 2,2 м (б) на поверхность морского ледяного покрова при температуре льда: $-4,0$ °С (а) и $-10,0$ °С (б)

В случае «теплого» льда, сфера, в зависимости от запаса её кинетической энергии, внедряется в его поверхность по схеме воздействия индентора в полупространство из упруго-пластического или даже пластического материала (рис. 5 а). Здесь сфера просто «входит» в массив слабосвязанных кристаллов, отделяя их друг от друга, частично ломая, сминая и уплотняя весь объем, при этом отчетливо прослеживается полусферическая зона всесторонне сжатого объёма продуктов разрушения льда, представляющих собой его отдельные кристаллы и их обломки.

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 (рис. 5 б). Поэтому, учитывая эти весьма существенные особенности свойств льда, в расчетах ледовой нагрузки на сооружение, разрушение льда можно описывать как по упруго-хрупкому механизму, так и по вязко-упругому. Это дает основание считать механизмы разрушения льда при использовании метода индентирования для определения удельной энергии разрушения льда ϵ_{cr} адекватным механизму разрушения льда на контакте с опорой.

Результаты двух типов выполненных экспериментов (рис. 6) – по внедрению сферических инденторов в поверхность натурального ледового покрова [2] и по воздействию модели опоры на его торцевую грань [9] – позволили выполнить валидацию принятых феноменологической и численной информационных моделей, которыми были предсказаны механизмы разрушения льда развитием системы трещин в торце ледовой пластины разной толщины при воздействии на неё цилиндрической опоры сооружения.

Второй целью физических экспериментов было детальное изучение механизма разрушения льда для применения в *разработке энергетической математической модели* контактного взаимодействия ЛП с опорой МЛЮ с учетом циклического характера ледовой нагрузки. Результатами полунатурных экспериментов (рис. 6), помимо достигнутых целей, являются два важных вывода. Во-первых, *характер накопления потенциальной упругой энергии* в объеме льда при его упругом деформировании, как показывает сравнение данных нашего опыта с опытом японских исследователей [21] по медленному (скорость ниже на 2 порядка) вдавливанию модели опоры в лед, остается идентичным в диапазоне реальных скоростей взаимодействия ЛП с МЛЮ. Во-вторых, особо следует отметить, как результат проведенного сравнительного исследования, что *период разрушения льда напрямую зависит от скорости ЛП*.



**Рис. 6 Сравнение типов разрушения льда при ударе твердой сферой (а) и при прорезании опорой сооружения ледового поля (б):
I – зона сколов льда; II – зона всестороннего сжатия; III – зона сплошной трещиноватости; IV – зона магистральных трещин**

Заключение

Достаточно подробный ретроспективный анализ нормативных методологий определения ледовой нагрузки на морские ледостойкие объекты, как и всего спектра существующих подходов к разработке моделей разрушения льда для совершенствования этих методологий, показывает, что концепция силового подхода к описанию механизма разрушения льда не отвечает условиям получения надежных исходных данных для динамического расчета морских ледостойких сооружений, подверженных циклическим ледовым нагрузкам.

Рассмотренная дескриптивная феноменологическая модель, верифицированная результатами выполненных численных и физических экспериментов, однозначно показывает, что для описания частоты циклов ледовой нагрузки на сооружение необходимо процесс разрушения льда рассматривать во времени, т.е. использовать энергетический подход.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апполонов Е.М., Платонов В.В. Новая модель динамического разрушения льда как основа для совершенствования требований правил регистра к ледовым усилениям судов и ледоколов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. № 4(390). С. 99–116. doi:10.24937/2542-2324-2019-4-390-99-116
2. Гомольский С.Г., Храпатый Н.Г., Цуприк В.Г. Исследования ударов твердого тела о лед // Ледотермические явления и их учёт при возведении и эксплуатации гидроузлов и гидротехнических сооружений. Л.: Энергия, 1979. С. 73–76.
3. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения // Труды ВИАМ. 2017. № 10(58). С. 97–111. doi:10.18577/2307-6046-2016-0-8-11-11
4. Курдюмов В.А., Хейсин Д.Е. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед // Прикладная механика. 1976. Т. 12, № 10. С. 103–109.
5. Мансуров М.Н., Востров В.К. Критические ледовые воздействия на морские нефтегазопромышленные сооружения // Вести газовой науки. 2017. № 1(29). С. 119–128.
6. СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Стандартинформ, 2019. 126 с.

7. Хейсин Д.Е., Лихоманов В.А. Экспериментальное определение удельной энергии механического дробления льда при ударе // Проблемы Арктики и Антарктики. 1973. № 41. С. 55–61.
8. Хейсин Д.Е., Черепанов Н.В. Изменение структуры льда в зоне удара твердого тела о поверхность ледяного покрова // Проблемы Арктики и Антарктики. 1970. № 34. С. 79–84.
9. Храпатый Н.Г., Цуприк В.Г. Полунатурные исследования динамического воздействия льда на опоры гидротехнических сооружений // Ледотермические явления и их учёт при возведении и эксплуатации гидроузлов и гидротехнических сооружений. Л., Энергия, 1979. С.101–104.
10. Цуприк В.Г., Беккер А.Т. О генерации циклической нагрузки при разрушении льда на опорах шельфовых сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2017. Т. 284. С. 102–118.
11. Цуприк В.Г. Энергетическая концепция нормирования прочности льда для расчета ледовой нагрузки на вертикальные структуры // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2016. Т. 279. С. 85–105.
12. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
13. Abramian A., Vakulenko S. New Nonlinear Model for Ice Induced Vibrations. Dynamical Processes in Generalized Continua and Structures, Springer, Cham, 2019. 1–16 p. doi:10.1007/978-3-030-11665-1
14. Andrianopoulos N.P., Manolopoulos V.M. Elastic strain energy density decomposition in failure of ductile materials under combined torsion-tension. Int J of Mechanical and Materials Engineering. 2014;(9):1–16. doi:10.1186/s40712-014-0016-5
15. Bekker A.T. The Ice Load Formation Modeling in the Interaction of Ice Plate with a Cylindrical Indenter. Proceed. of the 25 Int Ocean and Polar Eng Conf. Kona, Hawaii, 2015. 1723–1729 p.
16. Bekker A.T., Perepelitsa A.N. The stochastic model of ice force on offshore structures in time domain. Proceed. ISOPE Conf., Seoul, 1990. V. 2. 335–340 p.
17. Croasdale K.R., Morgenstern N.R., Nuttall J.B. Indentation tests to investigate ice pressures on vertical piers. J Glaciology. 1977;(81):301–312.
18. Daley C.G. Ice edge contact and failure. Cold Regions Science and Technology. 1992;(21):1–23.
19. Daley C.G. Sea Ice Engineering, theory and application. Memorial University of Newfoundland St. John's, Canada, 2017. 154 p.
20. Hallam S.D., Duval P., Ashby M.F. A study of cracks in polycrystalline ice under uniaxial compression. Le J de Physique Colloques. 1987;(48):303–311. doi:10.1051/jphyscol:1987143
21. Hirayama K., Schwarz J., Wu H.C. Ice forces of vertical pile indentation and penetration. Proceed. IAHR Ice Symp., Hanover, 1975. 442–445 p.
22. Ince S.T., Kumar A. and Paik J.K. A new constitutive equation on ice materials. Ships and Offshore Structures, 2017(12):610-623. doi:10.1080/17445302.2016.1190122
23. ISO/FDIS 19906. Petroleum and natural gas industries: Arctic offshore structures: ISO 19906:2019. International Organization for Standardization (Draft), 2019.
24. Ji X., Oterkus E. Physical mechanism of ice/structure interaction. J of Glaciology. 2018;64-(244):197–207. doi:10.1017/jog.2018.5
25. Ji X., Karr, Dale G., Oterkus E. A non-simultaneous dynamic ice-structure interaction model. Ocean Eng. 2018;(66):278–289. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.08.032
26. Jordaan I.J., Timco G.W. Dynamics of the Ice-Crushing Process. J of Glaciology, 1988;34-(118):-318–326.
27. Kärnä T., Turnunen R. A straightforward technique for analyzing structural response to dynamic ice action. Proceed. of 9th Int. Offshore Mech. And Arctic Eng., Houston, 1990. 135–142 p.
28. Karulin E., Marchenko A., Karulina M. et al. Field Indentation Tests of Vertical Semi-Cylinder on First-Year Ice. Proceed. 22nd Int Symp on Ice. Singapore. IAHR, 2014. 179–186 p.
29. Kendall K. Complexities of compression failure. Proceed. R. Soc. Lond. 1978;(361):245–263. doi:10.1098/rspa.1978.0101
30. Kim E., Amdahl J., Løset S. Development of ice failure and yield criteria for accidental limit state design. 21st Int Conf on Port & Ocean Eng under Arctic Cond (POAC'11), Montréal, 2011. 98–109 p.
31. Kolari K. A complete three-dimensional continuum model of wing-crack growth in granular brittle solids. International J of Solids and Structures. 2017;(115–116):27–42. doi:10.1016/j.ijsolstr.2017.02.012
32. Kolymbas D. The misery of constitutive modelling. Constitutive Modelling of Granular Materials, Springer, Berlin, Heidelberg, 2000. 11–24 p. doi:10.1007/978-3-642-57018-6_1

33. Kryzhevich G., Karulina M., Karulin E. Experimental Study of Ice Loads in a Test Basin under Action of Granulated and Columnar Crystal Ice on an Elastic Model. Proc of the Twenty-fifth Int Ocean and Polar Eng Conf, Kona, USA, 2015. 1780–1791 p.
34. Kujala P. Modelling of the ice edge failure process with curved failure surfaces. Int Symp on Applied Snow and Ice research, Rovaniemi, Finland, 1993. 1–16 p.
35. O'Rourke B.J., Jordaan I.J., Taylor R.S., Gürtner A. Experimental Investigation of Oscillation of Loads in Ice High-Pressure Zones, Part 1: Single Indentor System. Cold Regions Science and Technology. 2016;(124):25–39. doi: 10.1016/j.coldregions.2015.12.005
36. Shkhinek K.N., Kärnä T., Kapustiansky S.M., Jilenkov A.G. Extrusion model of crushed ice. Proceed. 16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'01, Ottawa, 2001. 1385–1394 p.
37. Sodhi D.S. Crushing failure during ice-structure interaction. Engineering Fracture Mechanics. 2001;(68):1889–1921.
38. Tsuprik V.G. The Fracture Laws of Ice Edge in its Interaction with the Shaft Surface of the Structure. Proceed. of the Twenty- fifth International Ocean and Polar Engineering Conference, Kona, Hawaii Big Island, USA, 2015. 1803–1808 p.
39. Wu T., Qiu W. Simulation of Stochastic Ice Force Process of Vertical Offshore Structure Based on Spectral Model. CMES. 2018;115(1):47–66. doi:10.3970/cmcs.2018.115.047
40. Wu T., Qiu W. A Dynamic Ice-structure Interaction Model for Prediction of Ice-induced Vibration. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2019;63(2):550–561. doi:10.3311/PPci.13080
41. Xu Y., Hu Z., Ringsberg J.W., Chen G., Meng X. An ice material model for assessment of strain rate, temperature and confining pressure effects using finite element method. Ships and Offshore Structures. 2018(1):1–11. doi:10.1080/17445302.2018.1553134.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2021. N 4/49

Hydraulic Engineeringwww.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/90-105>

Tsuprik V.

VLADIMIR G. TSUPRIK, Candidate of Engineering Sciences, Professor of Department Marine Arctic Technologies, vg_tsuprik@mail.ru
 Polytechnical Institute
 Far Eastern Federal University,
 Vladivostok, Russia

Substantion of the energy approach to parameter determination of the cyclic ice force against offshore structures

Abstract: The determination of the magnitude of the ice force effect on the marine ice-resistant base structures (MIRB) is carried out according to the calculation formula accounting for adopted failure model. The ice in the contact zone can be damaged with different failure mechanisms depending on ice temperature, rate etc. The model of ice elastic–brittle fracture is presented taking into account the damage of the ice cover edge by all possible types of cracks dividing the active contact zone into wedge-shaped or trapezoidal fragments. All the processes of ice failure of different nature are proposed to be considered as a complex process. The mathematical description of the process in time is based on a universal energy criterion of failure. The substantiations include the phenomenological analysis of the phenomenon of cyclic ice failure in the contact zone, the results of numerical modeling of the ice cover edge in the interface zone, data of physical modeling. The criterion is the limit value of the potential energy of elastic compression accumulated in unit ice volume before the structure. It is the specific elastic energy of mechanical failure of sea ice. Also the test results with ice big samples under dynamic compression are presented.

Keywords: offshore structure; vibration; sea ice; fracture; cyclic load; energy approach; specific energy of fracture

For citation: Tsuprik V. Substantion of the energy approach to parameter determination of the cyclic ice force against offshore structures. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2021;(49):90-105. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/90-105>

REFERENCES

1. Appolonov Ye., Platonov V. New model of dynamic ship failure as basis for improvement of RS requirements to ice belts of ice-going ships and icebreakers. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019;4(390):99–116. doi:10.24937/2542-2324-2019-4-390-99-116
2. Gomol'skij S.G., Hrapatyj N.G., Cuprik V.G. Issledovaniya udarov tverdogo tela o led. Ledotermicheskie yavleniya i ih uchyot pri vozvedenii i ekspluatatsii gidrouzlov i gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. L., Energiya. 1979. P. 73–76.
3. Erasov V.S., Oreshko E.I. Silovoj, deformatsionnyj i energeticheskij kriterii razrusheniya. Trudy VIAM. 2017;10(58):97–111. doi:10.18577/2307-6046-2016-0-8-11-11.
4. Kurdyumov V.A., Hejsin D.E. Gidrodinamicheskaya model' udara tverdogo tela o led. Prikladnaya mekhanika. 1976;10(XII):103–109.
5. Mansurov M.N., Vostrov V.K. Kriticheskie ledovye vozdejstviya na morskije neftegazopromyslovye sooruzheniya. Vesti gazovoj nauki. 2017;1(29):119–128.
6. SP 38.13330.2018. Loads and impacts on hydraulic structures (from wave, ice and ships). Moscow, Standartinform, 2019. 126 p.
7. Hejsin D.E., Lihomanov V.A. Eksperimental'noe opredelenie udel'noj energii mekhanicheskogo drobleniya l'da pri udare. Problemy Arktiki i Antarktiki. 1973;(41):55–61.
8. Hejsin D.E., Cherepanov N.V. Izmenenie struktury l'da v zone udara tverdogo tela o poverhnost' ledyanogo pokrova. Problemy Arktiki i Antarktiki. 1970;(34):79–84.
9. Hrapatyj N.G., Tsuprik V.G. Polunaturnye issledovaniya dinamicheskogo vozdejstviya l'da na opory gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. Ledotermicheskie yavleniya i ih uchyot pri vozvedenii i ekspluatatsii gidrouzlov i gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. L., Energiya, 1979. 101–104 p.
10. Tsuprik V.G., Bekker A.T. On cyclic load generation during ice breaking at off-shore structures supports. Proceeding of the VNIIG. 2017;(284):102–118.
11. Tsuprik V.G. Energy concept of ice strength normalization for calculation of ice load on vertical structures. Proceeding of the VNIIG. 2016;(279):85–105.
12. Cherepanov G.P. Mekhanika hrupkogo razrusheniya. Moscow, Nauka, 1974. 640 p.
13. Abramian A., Vakulenko S. New Nonlinear Model for Ice Induced Vibrations. Dynamical Processes in Generalized Continua and Structures, Springer, Cham, 2019. 1–16 p. doi:10.1007/978-3-030-11665-1
14. Andrianopoulos N.P., Manolopoulos V.M. Elastic strain energy density decomposition in failure of ductile materials under combined torsion-tension. Int J of Mechanical and Materials Engineering. 2014;(9):1–16. doi:10.1186/s40712-014-0016-5
15. Bekker A.T. The Ice Load Formation Modeling in the Interaction of Ice Plate with a Cylindrical Indenter. Proceed. of the 25 Int Ocean and Polar Eng Conf. Kona, Hawaii, 2015. 1723–1729 p.
16. Bekker A.T., Perepelitsa A.N. The stochastic model of ice force on offshore structures in time domain. Proceed. ISOPE Conf., Seoul, 1990. V. 2. 335–340 p.
17. Croasdale K.R., Morgenstern N.R., Nuttall J.B. Indentation tests to investigate ice pressures on vertical piers. J Glaciology. 1977;(81):301–312.
18. Daley C.G. Ice edge contact and failure. Cold Regions Science and Technology. 1992;(21):1–23.
19. Daley C.G. Sea Ice Engineering, theory and application. Memorial University of Newfoundland St. John's, Canada, 2017. 154 p.
20. Hallam S.D., Duval P., Ashby M.F. A study of cracks in polycrystalline ice under uniaxial compression. Le J de Physique Colloques. 1987;(48):303–311. doi:10.1051/jphyscol:1987143
21. Hirayama K., Schwarz J., Wu H.C. Ice forces of vertical pile indentation and penetration. Proceed. IAHR Ice Symp., Hanover, 1975. 442–445 p.
22. Ince S.T., Kumar A. and Paik J.K. A new constitutive equation on ice materials. Ships and Offshore Structures. 2017(12):610-623. doi:10.1080/17445302.2016.1190122
23. ISO/FDIS 19906. Petroleum and natural gas industries: Arctic offshore structures: ISO 19906:2019. International Organization for Standardization (Draft), 2019.
24. Ji X., Oterkus E. Physical mechanism of ice/structure interaction. J of Glaciology. 2018;64-(244):197–207. doi:10.1017/jog.2018.5
25. Ji X., Karr, Dale G., Oterkus E. A non-simultaneous dynamic ice-structure interaction model. Ocean Eng. 2018;(66):278–289. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.08.032
26. Jordaan I.J., Timco G.W. Dynamics of the Ice-Crushing Process. J of Glaciology, 1988;34 (118):-318–326.

27. Kärnä T., Turnunen R. A straightforward technique for analyzing structural response to dynamic ice action. *Proceed. of 9th Int. Offshore Mech. And Arctic Eng.*, Houston, 1990. 135–142 p.
28. Karulin E., Marchenko A., Karulina M. et al. Field Indentation Tests of Vertical Semi-Cylinder on First-Year Ice. *Proceed. 22nd Int Symp on Ice*. Singapore. IAHR, 2014. 179–186 p.
29. Kendall K. Complexities of compression failure. *Proceed. R. Soc. Lond.* 1978;(361):245–263. doi:10.1098/rspa.1978.0101
30. Kim E., Amdahl J., Løset S. Development of ice failure and yield criteria for accidental limit state design. *21st Int Conf on Port & Ocean Eng under Arctic Cond (POAC'11)*, Montréal, 2011. 98–109 p.
31. Kolari K. A complete three-dimensional continuum model of wing-crack growth in granular brittle solids. *International J of Solids and Structures*. 2017;(115–116):27–42. doi:10.1016/j.ijsolstr.2017.02.012
32. Kolymbas D. The misery of constitutive modelling. *Constitutive Modelling of Granular Materials*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2000. 11–24 p. doi:10.1007/978-3-642-57018-6_1
33. Kryzhevich G., Karulina M., Karulin E. Experimental Study of Ice Loads in a Test Basin under Action of Granulated and Columnar Crystal Ice on an Elastic Model. *Proc of the Twenty-fifth Int Ocean and Polar Eng Conf*, Kona, USA, 2015. 1780–1791 p.
34. Kujala P. Modelling of the ice edge failure process with curved failure surfaces. *Int Symp on Applied Snow and Ice research*, Rovaniemi, Finland, 1993. 1–16 p.
35. O'Rourke B.J., Jordaan I.J., Taylor R.S., Gürtner A. Experimental Investigation of Oscillation of Loads in Ice High-Pressure Zones, Part 1: Single Indentor System. *Cold Regions Science and Technology*. 2016;(124):25–39. doi:10.1016/j.coldregions.2015.12.005
36. Shkhinek K.N., Kärnä T., Kapustiansky S.M., Jilenkov A.G. Extrusion model of crushed ice. *Proceed. 16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'01*, Ottawa, 2001. 1385–1394 p.
37. Sodhi D.S. Crushing failure during ice-structure interaction. *Engineering Fracture Mechanics*. 2001;(68):1889–1921.
38. Tsuprik V.G. The Fracture Laws of Ice Edge in its Interaction with the Shaft Surface of the Structure. *Proceed. of the Twenty- fifth International Ocean and Polar Engineering Conference*, Kona, Hawaii Big Island, USA, 2015. 1803–1808 p.
39. Wu T., Qiu W. Simulation of Stochastic Ice Force Process of Vertical Offshore Structure Based on Spectral Model. *CMES*. 2018;115(1):47–66. doi:10.3970/cmes.2018.115.047
40. Wu T., Qiu W. A Dynamic Ice-structure Interaction Model for Prediction of Ice-induced Vibration. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2019;63(2):550–561. doi:10.3311/PPci.13080
41. Xu Y., Hu Z., Ringsberg J.W., Chen G., Meng X. An ice material model for assessment of strain rate, temperature and confining pressure effects using finite element method. *Ships and Offshore Structures*. 2018(1):1–11. doi:10.1080/17445302.2018.1553134.