УДК 539.42:551.467+551.321.8
EDN: NLVVJP

В.Г. Цуприк
ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МАКРОФЕНОМЕНОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА МОРСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Объект и цель научной работы. В работе рассмотрены процесс и результат разработки практического метода прогнозирования значений основных параметров циклической ледовой нагрузки на шельфовое сооружение, адекватных реальным процессам контактного разрушения льда. Даны теоретическое и эмпирическое обоснования применения энергетического критерия разрушения льда в численных моделях его взаимодействия с морскими объектами.

Материалы и методы. Построение универсальной энергетической модели разрушения льда описывается комплексным процессом разрушения единовременно на всех иерархических уровнях массива льда ледового поля как для микро-, так и для мезо- и макроструктурных уровней морского льда. Расчетный метод основан на дескриптивной энергетической макрофеноменологической модели разрушения льда, использующей энергетический интегральный критерий упругопластического разрушения льда.

Основные результаты. Показано, что энергетическая модель разрушения льда интегрально описывает все явления процесса деформирования и разрушения его сжатого объема затратами упруго накопленной в нем энергии и позволяет получать требуемые нормами параметры цикличности динамического процесса взаимодействия ЛП с морскими ледостойкими объектами (МЛО) в качестве значений исходной нагрузки для выполнения динамического расчета конструкции объекта.

Заключение. Представленная модель с учетом опубликованных автором ранее результатов валидации является основанием для ее номинации на нормативную и применения в практике прогнозирования расчетных параметров цикличности ледовых нагрузок на МЛО.

Ключевые слова: морские объекты, морской лед, ледовые нагрузки, разрушение льда, параметры цикличности, энергетическая модель, энергетический критерий разрушения.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

УДК 539.42:551.467+551.321.8
EDN: NLVVJP

V.G. Tsuprik
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

MACRO-PHENOMENOLOGICAL ENERGY MODEL OF ICE FAILURE FOR PRACTICAL CALCULATIONS OF PARAMETERS OF CYCLIC ICE LOADS ON MARINE FACILITIES

Object and purpose of research. The paper presents theoretical and empirical validation of the universal energy concept for describing a complex failure process of ice field massif intended for elaboration of the prediction method adequate to capture real processes to supply input data for regulatory dynamic calculations of structures, i.e. duration of ice failure and maximum contact force.

Materials and methods. The universal energy model of ice failure is described by an integrated failure process occurring simultaneously *at all hierarchical levels* of the ice field massif including micro-, meso- and macro-structural scales of sea

Для цитирования: Цуприк В.Г. Энергетическая макрофеноменогическая модель разрушения льда для практического расчета параметров циклической ледовой нагрузки на морские объекты. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; Специальный выпуск 1: 190–201.

For citations: Tsuprik V.G. Macro-phenomenological energy model of ice failure for practical calculations of parameters of cyclic ice loads on marine facilities. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; Special Issue 1: 190–201 (in Russian).

ice. The prediction method is based on a descriptive macro-phenomenological energy model of ice failure using the integral energy criterion of elastic-plastic ice failure.

Main results. It is demonstrated that the energy model of ice failure is able to describe all deformations and failures of the compressed ice volume using consumption of the energy elastically accumulated in ice and allows us to obtain regulatory parameters of dynamic interaction cycle between ice and ice-resistant marine structures, i.e. initial load inputs for dynamic calculation of structures.

Conclusion. The suggested model supported by results of its validation earlier published by the author provides the basis for being nominated as a normative model for application in the practical design calculation of ice load cycle parameters for ice-resistant marine structures.

Keywords: marine objects; sea ice; ice loads; ice failure; load cycle parameters; energy model; energy criterion of failure.

The author declares no conflicts of interest.

Введение

Исследования в области определения расчетных значений контактного давления ледового поля (ЛП) на опору гидротехнического сооружения (как и на обшивку ледокола) – одна из главных задач, разрабатываемых ледотехниками на протяжении более полувека.

В последние десятилетия, с появлением мощных компьютеров, в прогнозировании ледовых нагрузок на стационарные и плавучие морские ледостойкие объекты (МЛО) получило широкое развитие направление математического моделирования процесса прорезания ледовых полей конструкциями таких объектов. Его основой являются конститутивные модели (КМ) деформирования и разрушения льда, реализуемые одним из применяемых численных методов (ЧМ). По умолчанию основная часть указанных КМ разрабатываются в качестве гипотезы, претендующей на теорию, как основание для разработки изменений в существующие нормы расчета ледовых нагрузок на МЛО.

В то же время давно установлено, что составление любой конститутивной математической модели является упрощением сложного физического поведения деформирования материала, особенно такого уникального природного материала как морской лед. В работе [2], например, где представлен систематический обзор основ конститутивного моделирования и поведения материала при деформировании, подчеркивается, что «…не существует такой вещи, как "точная" модель для конкретного материала, так как, кроме линейных явлений, нет никакого уникального способа построения конститутивной модели для определенного поведения».

Не анализируя здесь эффективность и точность ЧМ, уточним, что в настоящее время для начала реализации конечно-элементного программного кода, описывающего модель взаимодействия льда с морским объектом, требуется простая процедура введения пользователем в программу двух видов главных исходных данных: расчетного уравнения модели процесса деформирования его представительного объема и критерия разрушения льда. Но точность решения уравнений компьютером не решает проблему адекватности реальному процессу деформирования морского льда заложенной в библиотеку КМ.

1. О проблемах конститутивного моделирования в механике льда

Освещенные в печати модели льда разрабатывались с применением всех известных в теории пластичности подходов [29]: макромеханического, структурно-механического, термодинамического и физического, в рамках которых формулируются конститутивные соотношения, значительно отличающиеся математической структурой, существенным образом определяющей свойства каждой модели.

Экспертный анализ достоинств и недостатков разработанных моделей и критериев разрушения льда профессионально и объективно приводится в ряде специализированных обзоров [9, 21, 25, 26] множества исследовательских статей по данной тематике, а также в обзорах, предваряющих собственные изыскания авторов в этой области в их работах [1, 5, 23, 24, 30].

В совокупности все опубликованные обзоры охватывают широкий спектр разработанных разными авторами типов моделей льда (от классических силовых, деформационных и термодинамических до «авторских» составных и многоуровневых), а также критериев его разрушения, вытекающих из использовавшихся в этих работах разнообразных поверхностей текучести и соотношений внутренних переменных величин теории упругости континуума, включая те, которые теперь «представляют только исторический интерес» [11].

Анализ рассмотренных работ последних десятилетий показал, что достоверное феноменологическое описание всего комплекса процессов деформирования и разрушения морского льда является главной

проблемой в создании точной математической модели, описывающей это явление с учетом основных свойств льда. И это – ключевая, но не единственная трудность данной методологии, которую условно можно обозначить как «КМ – МКЭ». В численной постановке задачи именно КМ имеет решающее значение как предлагаемая гипотеза, описывающая поведение льда системой нелинейных уравнений, поскольку существующие аппаратные и численные процедуры являются продвинутыми в интегрировании по времени заданных уравнений.

Вторая неотъемлемая часть этой методологии – назначение *критерия разрушения льда,* который необходим в модели «процесса взаимодействия» в качестве критического значения прочности (жесткости, трещиностойкости) материала, т.е. в качестве «спускового механизма» для начала развития разрушения в напряженном объеме льда.

Третья трудность состоит в корректном назначении материальных констант, т.к. в каждом «новом» конститутивном уравнении вводятся собственные «новые» материальные константы. Поэтому появляется законный вопрос о том, как их определить, т.е. как откалибровать КМ, приспособив ее ко льду с конкретными начальными и граничными условиями задачи его нагружения.

1.1. Разнообразие конститутивных моделей деформирования льда и их калибровка

В последней четверти XX в. усилиями большого числа исследователей было достигнуто однозначное понимание сути ключевых механических и физических процессов деформирования и разрушения льда непосредственно в его контактной зоне перед внедряющейся в него поверхностью. Известный исследователь по механике льда А.К. Палмер и его соавторы в труде «Разрушение и его роль в описании ледовых сил на шельфовых сооружениях» [15] однозначно показывают, что «универсальная формула для определения ледовой нагрузки не может быть получена, … и в нынешнем состоянии знаний было бы неразумно ожидать слишком многого». Так же четко об этом говорит Г.С. Шапиро [31]: «описать деформирование льда с помощью одного закона, учитывающего все названные свойства, по-видимому, невозможно».

В монографии [30] на основании анализа проблемы приводятся аналогичные выводы из исследований многих ведущих экспертов в области механики льда. Тем не менее на протяжении многих лет, особенно в последние десятилетия, проводятся исследования, направленные на поиски таких «универсальных» моделей деформирования и разрушения льда, в которых «кусочно» описываются процессы перехода от механизма вязкости и текучести к хрупкому механизму деформирования льда с описанием начала его разрушения различными критериями или даже «единым критерием разрушения» [1, 5, 23, 24].

Достаточно сложные модели представлены, например, в ряде работ, авторы которых, в силу невозможности соблюсти автомодельность изменения конститутивного соотношения с переходом процесса деформирования по иерархической шкале реакции (сопротивления) льда на изменение скорости нагружения, например, или его температуры – ограничиваются математическим описанием части процесса деформирования льда. Чаще других применяются составные двух- и трехдиапазонные модели, которые используют: модели изотропного упругопластичного материала с критерием текучести «Цай-Ву» [6]; критерий текучести Друкера – Прагера в вязкоупругопластической модели и вязкоупругую модель деформации льда Кельвина – Фойгта [22]; 3D критерий хрупкого разрушения [5]; анизотропную континуальную модель 3D трещины [12].

В частности, в [24] описана сложная составная трехкомпонентная феноменологическая модель с учетом зависимости напряжения от скорости деформации с одновременным учетом длины и пространственной корреляции растрескивания льда; калибровка выполнена по соответствию данным тестов на вдавливание, взятых из внешнего источника. Критерий текучести «Цай Ву» применен в качестве единого критерия в 3D нелинейной вязкоупругопластической конститутивной составной модели (три модели: Бюргерса, Глена и Эшби) [23], которую авторы позиционируют как «универсальную модель для динамического моделирования взаимодействий льда и структуры».

Здесь модель калибровалась с помощью трех наборов сравнений между результатами численного моделирования и результатами выполненных экспериментов по ползучести и вдавливанию. Авторы утверждают, что численная проверка модели доказала, что она описывает весь диапазон реологического поведения льда от вязкоупругого до хрупкого. В большей части работ вопрос калибровки моделей не обозначается, в других предложено калибровать новые эмпирические параметры по данным опубликованных одноосных [24 и др.] или трехосных [5] испытаний образцов, либо сравнением полученной зависимости давления от площади по стандарту ИСО [6], что вызывает сомнения в корректности такого рода калибровки.

1.2. О корректности и применении конститутивных моделей разрушения льда в нормах

Достаточно емким анализом приведенных выше тематических обзоров и оригинальных статей по разработке КМ разрушения льда автор, опираясь на мнения авторитетных экспертов, преследует цель показать, что, согласно основам теории определяющих (конститутивных) соотношений (ОС) [29] такой широкий круг поисков модели, адекватной реальному процессу разрушения льда в процессе воздействия ледового поля (ЛП) на инженерную конструкцию, говорит о различных концептуальных подходах к постановке одной и той же задачи. Это порождает вопрос о необходимости и целесообразности этой деятельности в отрыве от собственно физики и механики изучаемого явления, но главное – от проектно-изыскательской практики, потому что абсолютное большинство таких моделей не предлагалось их разработчиками в качестве методологической основы для инженерных приложений, т.е. для использования в нормативных документах.

Аналогичные сомнения и серьезная критика в адрес разработчиков многочисленных сложных и не коррелирующих между собой КМ разрушения кристаллических и гранулированных материалов типа льда неоднократно публиковались и ранее. В частности, К.Г. Дейли, один из ведущих экспертов в области моделирования контактного разрушения льда, в 2017 г. в монографии так охарактеризовал ситуацию с моделированием поведения льда: «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» [3].

В сборнике трудов трех ежегодных европейских конференций по современной ситуации конститутивного моделирования зернистых материалов его редактор, профессор Д. Колимбас в заглавной статье «Невзгоды конститутивного моделирования» также охарактеризовал сложившуюся ситуацию в сфере конститутивного моделирования в геотехнике большим разнообразием сложных и трудноразрешимых математических моделей. Он высказал аргументированное мнение о том, что, «…возможно, имеющиеся в настоящее время КМ – это не совсем то, что нужно инженерной практике и …их следует рассматривать скорее как академическое упражнение» [13, с. 12].

2. Подходы к задаче разработки модели разрушения льда для норм

Существующие нормативные документы по расчету ледовых нагрузок на морские объекты описывают условные схемы наступления «предельного напряженного состояния» на контактной поверхности ЛП с внедряющейся поверхностью МЛО. Как статическая модель «смятия льда» Коржавина, так и гидродинамические модели экструзии льда Хейсина, Курдюмова, Апполонова и Платонова, а также статистическая «модель Р-А» разрушения льда в зонах высокого давления не могут использоваться для получения параметров динамического процесса взаимодействия ЛП с МЛО.

Однако остается актуальной задача разработки «инженерной» модели и критерия динамического разрушения льда в процессе контакта ЛП с МЛО, позволяющих рассчитать пиковое значение циклической ледовой нагрузки на объект и частоты пиков. Эти два параметра циклической ледовой нагрузки на морской объект на стадии его проектирования являются базовыми исходными параметрами для выполнения обязательных нормативных требований динамического расчета конструкций на недопустимость возникновения резонансных явлений объектов на стадии их эксплуатации.

Для решения данной задачи здесь представлены подходы к разработке динамической феноменологической макромодели взаимодействия МЛО с кромкой льда ЛП со «встроенным» критерием разрушения льда энергетического типа, который можно определять для конкретных ледовых условий на стадии проектно-изыскательских работ практически стандартными методами.

Постановка задачи основывается как на результатах теоретических исследований ряда моделей и критериев разрушения энергетического типа для льда, так и на данных лабораторных, полунатурных и натурных экспериментов, в т.ч. работ автора по изучению механизмов разрушения льда в торцевой грани ЛП в зоне его контактного взаимодействия с МЛО [10, 18–20, 30].

2.1. Иерархия зон деформирования и разрушения льда перед морским объектом

Выполненный краткий анализ работ отечественных и зарубежных исследователей по описанию конститутивными соотношениями механизма разрушения льда показал два вида исследуемого процесса. При

этом превалирует постановка задачи получения предельных значений внешней нагрузки, вызывающей зарождение и развитие микротрещины в единичном объеме льда, аппроксимируемого единичным конечным элементом в одном из численных методов реализации математической модели. Удаление элемента с микротрещиной из численного расчета принимается как бы частью пути продвижения макротрещины, но это искажает структуру моделируемого льда в отличие от реального материала, где элемент с микротрещиной остается на своем месте, поддерживая жесткость структуры массива льда.

Автору неизвестны исследования, описывающие переход от микроскопического описания разрушения поликристаллического льда, когда необходимо корректно учитывать размеры, а, возможно, и форму решетки его кристаллов, наличие солевых карманов и пр. (как элементарных элементов структуры льда с их параметрами), к описанию явления разрушения льда на уровне некоторого поликристаллического объема, в котором конститутивные отношения микроуровня уже не корректны, тем более как и для описания разрушения льда с интегральными характеристиками макросреды – континуума.

Необходимость «единовременного» рассмотрения процессов, происходящих на различных иерархических уровнях очевидна, поскольку явление процесса прорезания ледовой плиты поверхностью морского ледостойкого объекта (рис. 1*а*) происходит в результате одновременно протекающих, но совершенно различных типов стохастических субпроцессов на всех масштабных уровнях напряженно-деформированного объема льда в ледовой плите.

Поэтому результатом реализации разрабатываемой динамической модели контактного разрушения льда должен быть полный интегральный результат всего комплекса процессов, протекающих: у контактной поверхности ЛП – МЛО (зона микроуровня); в зоне зарождения макротрещин с дроблением ЛП на блоки в ближнем поле (зона мезоуровня); а зоне дальнейшего развития макротрещин до границы дальнего поля (зона макроуровня) (рис. 1*б*).

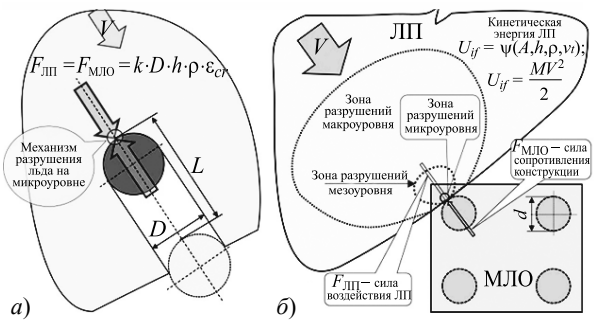


Рис. 1. Схемы контактного взаимодействия ледового поля с морскими ледостойкими объектами:
а) зонирование распределения энергии ледового поля, затрачиваемой на разрушение льда;
б) параметры области прорезания ледового поля опорой морских ледостойких объектов

2.2. Фрактальная природа разрушения льда на всех масштабных уровнях

Любой процесс разрушения – это развитие в деформируемом теле трещин всех масштабов и образование при их слиянии макротрещины, разделяющей его на части. Но непременным и важнейшим условием этого комплексного процесса в системе «нагрузка – деформируемое тело» на любом масштабном уровне является инициирование первичных трещин, зародившихся на самых «мелких» уровнях строения льда, и последовательное их соединение (слияние, коалисценция), в т.ч. срастанием крыловидных отростков первичных трещин в «магистральную макротрещину».

Инициация трещин во льду как «исходная, отправная точка» разрушения подробно исследовалась многими авторами [8, 12, 15–17, 19, 27, 28 и др.], которые отметили ряд особенностей процесса микротрещинообразования во льду. В частности отмечалось, что: трещины ориентированы преимущественно в вертикальной плоскости; они зарождались сначала на более крупных зернах; их средний размер составлял приблизительно от половины до полной длины грани зерна; с равной вероятностью они были трансгранулярными или межгранулярными; инициирование одной трещины не вызывлот образование других трещин поблизости; бывает относительно мало трещин с благоприятной ориентацией для образования «трещин крыла»; зарождение новых трещин превалирует над прорастанием уже зародившихся и пр.

Следует особо отметить, что все приведенные авторами закономерности зарождения и развития микротрещин во льду выявлены при выполнении экспериментов по сжатию мелкомасштабных кубических образцов льда либо пластин при их одно- или двухосном сжатии. Очевидно, что предел прочности кубического образца при его сжатии, используемый в «нормативных» моделях, основанных на теориях упругости предельных состояний, не пригоден даже для описания процесса микротрещинообразования в контактной зоне ЛП с МЛО.

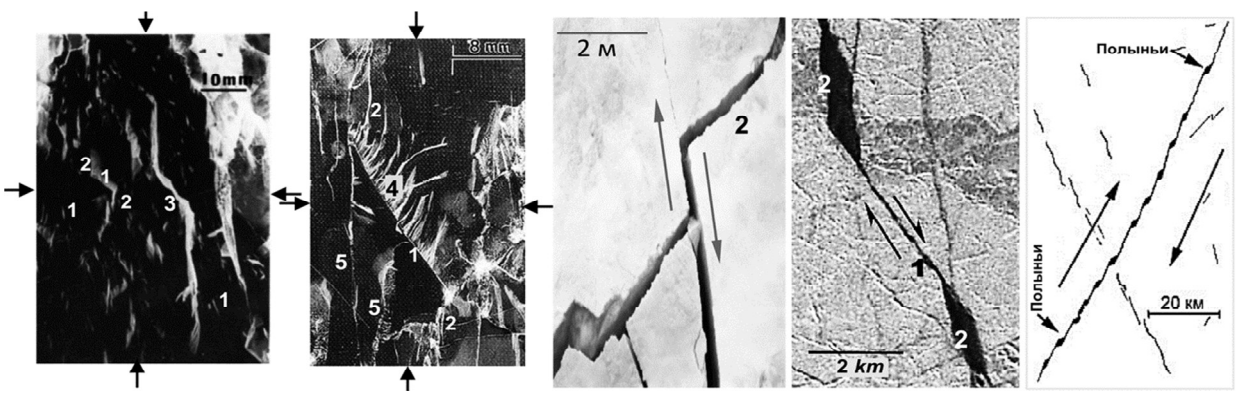
Об этом говорят результаты численного моделирования разрушения кубического образца, например, в [27 и др.], где однозначно показано, что «в экспериментах измеряют в основном $R_{сж}$, что явно не выражается через «микроскопическую» прочность льда». По той же причине этот критерий не может использоваться в моделях разрушения льда для описания процесса зарождения трещин нормального отрыва во льду гетерогенного строения на мезоуровне, рассматриваемого как поликристаллический конгломерат, так же, как в моделях льда для зоны макроуровня ледового поля, рассматриваемого как толстая плита из твердого деформируемого и однородного материала.

В то же время существует потребность в модели для описания всего комплекса процессов, одновременно происходящих на различных структурных уровнях, включая зарождение микротрещины в зоне контакта льда с сооружением, где лед деформируется и разрушается разрывом внутрикристаллических межатомных связей в ансамбле с разрывом межзеренных связей его структуры и происходит слияние микротрещин в макротрещину и ее прорастание в следующие по масштабу уровни: «ближнее» ледовое поле мезоуровня и зону макроразрушений. Кроме того, учитывая высокую активность исследований в области моделирования явлений взаимодействия морских объектов с дрейфующими ледовыми полями, появилась высокая потребность в адекватных критериях разрушения льда и методах их экспериментального получения.

В порядке рассмотрения описанной проблемы можно опереться на коллективный опыт всесторонних и глубоких исследований процессов зарождения и развития трещин на различных масштабных уровнях морского ледового покрова. На рис. 2 по данным многих авторов [3, 8, 12, 14–17, 19, 27, 28] приводятся примеры базовых элементов трещин и стадии их развития во льду в самом широком диапазоне масштабов его структуры, которые однозначно демонстрируют фрактальную природу образования трещин как в кристаллах льда, в его малых образцах, в небольших блоках (как поликристаллического деформируемого тела – гетерогенной среды), так и в массиве ледового поля как в гомогенной среде.

Из представленных на рис. 2 фотографий очевидно, что все трещины во льду, от микро- до макротрещин ледового покрова Северного ледовитого океана, имеют единообразный характер, обусловленный формой кристаллографической решетки льда, независимо от масштабного уровня напряженно-деформированного объема. Важный вывод из результатов приведенных исследований заключается в том, «…что процессы во льду не зависят от масштаба, они связаны с дислокациями в микроструктуре льда» [16], и это не согласуется с мнением о разрыве между физикой микроразрушения и механикой макротрещин. Обращает внимание, что разрушение льда во всех случаях происходит *сдвигом его структуры при сжатии* по линиям скольжения, ориентированным по направлению максимального сжимающего напряжения.

Краткий анализ показал, что природная фрактальность механизма разрушения структуры льда на разных масштабных уровнях может быть основанием для разработки единой, обобщенной фрактальной



а) *б*) *в*) *г*) *д*)

Рис. 2. Иллюстрации фрактальности природы зарождения и развития трещин в сжатых объемах льда разного масштаба: *а), б)* зарождение межзеренных (1) и внутризеренных (5) микротрещин по [16, 17]; развитие «крыльев» наклонных трещин сдвига (2) и образование макротрещины (3) в образце; развитие «гребенки» (4) вторичных трещин – ответвлений в один из кристаллов льда от межзеренной сдвиговой трещины; *в), г), д)* развитие и слияние «трещин крыла» при сдвиговом процессе разного масштаба в ледовом покрове по [17– *г)*] и по [28 – *д)*]

природой реальной трещины, модели динамического разрушения льда. Такая модель должна опираться на соответствующие ей критерий объемного разрушения льда сжатием и метод его тестирования, совокупность которых должна обеспечить методологическую обоснованность расчетной модели, ее адекватность реальным процессам деформирования льда в торце ЛП на контакте с МЛО.

Насколько известно, вопрос об определении репрезентативного объема льда (RVE – representative volume element) для описания механических процессов в морском ледовом покрове с научным обоснованием назначения размеров образца для испытаний, не рассматривался, в отличие от речного льда, где этот вопрос детально рассмотрен на количественном уровне [4].

Учитывая, что существующие методики испытаний льда на прочность методологически недостаточно обеспечены, несмотря на наличие рекомендаций секции ледовых проблем МАГИ, автором ранее рассматривалась задача выбора формы и размеров RVE для испытания морского льда методом динамического сжатия [18–20]. Пионерные исследования для рассматриваемой модели показывают, что описание процесса разрушения льда, адекватное реальным процессам, может обеспечить модель разрушения льда, основанную на использовании энергетического критерия, полученного при испытаниях RVE большого размера на динамическое сжатие, вызывающее его разрушение сдвиговыми трещинами и смятием. Полученный критерий можно принять за основу для дальнейших исследований данного вопроса, и, возможно, именно он удовлетворит также цели ряда ранее предлагавшихся «универсальных» многоуровневых моделей с отдельными критериями достижения предельных состояний льда на каждом уровне [1, 5, 23, 24].

Несмотря на удовлетворительные результаты валидации предложенной на основе исследований макромеханических свойств именного морского льда эмпирической модели и метода экспериментального определения энергетического критерия его разрушения (ε^*_{cr}) [18, 30], необходимо вербальное описание теоретического обоснования разработки адекватной макроскопической модели контактного взаимодействия ЛП с МЛО. Поэтому в постановке рассматриваемой здесь задачи (рис. 1*а*) ее решение будет разрабатываться путем описания картины всего комплекса стохастических явлений разрушения льда: единовременного развития микротрещины на микроуровне, слияния микротрещин и зарождений и прорастаний макротрещин в структуре поликристаллического льда на мезоуровне и далее, на макроуровне, в толстой ледовой плите как сплошной среде зернистой структуры с RVE в виде поликристаллического агрегата.

2.3. Энергетическое описание универсального природного механизма разрушения льда

Энергетический подход к математическому описанию процесса деформирования льда в данной задаче основан на понятии накопления упругой энергии до определенной ее плотности в некотором напряженном объеме льда под действием обобщенного нагружения сжатием, где подводимая к нему энергия деформации может быть аддитивно разложена на две части: упругую и неупругую.

Нарастание плотности упругой энергии в процессе ее притока в массив ЛП в зоне его воздействия на МЛО с учетом ее локальной диссипации, происходит с преодолением в отдельных его объемах начальных энергетических барьеров (рис. 3*а*, *б*). Достижение уровня критической плотности в некотором единичном объеме льда (рис. 3*в*, т. Y) характеризуется вы-

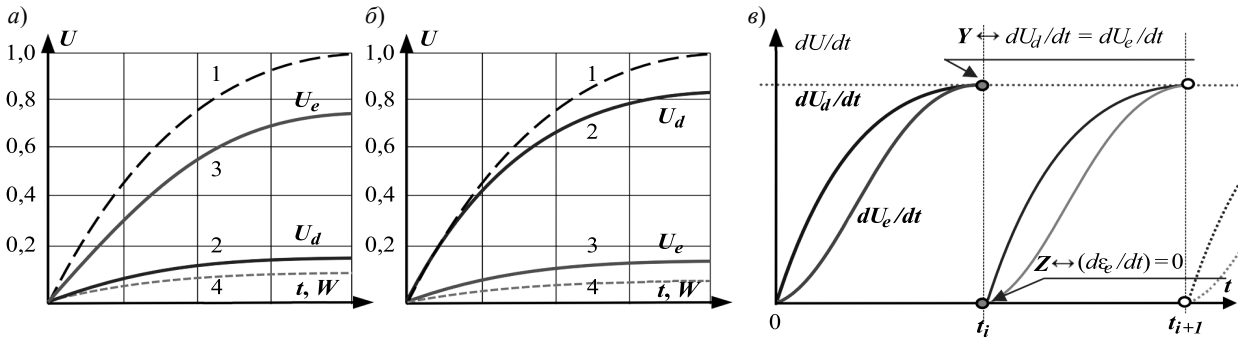


Рис. 3. Энергетическое описание особенностей деформирования льда в процессе его разрушения. Распределения общей энергии (1) деформирования льда в единичном объеме, соответствующие типу деформирования: *а*) упруго-хрупкому (3); *б*) вязкому (текучести – 2); *в*) график циклического процесса изменения скоростей притока и диссипации упругой энергии в единичном объеме льда до их выравнивания в т. *Y*, характеризующий уровень энергетического критерия разрушения льда ε_{cr}

равниванием мощности притока внешней энергии в нем (dU_e/dt) со скоростью ее поглощения (dU_D/dt). Это является триггером активации процессов разрушения в данном объеме (рис. 3, т. Y) и окончанием цикла процесса передачи кинетической энергии ЛП в массив льда при его нагружении. Эти процессы запускаются и развиваются хаотично по одному из механизмов диссипации (стока) энергии упругого деформирования, затрачиваемой на работу последовательного разрыва межатомных связей кристалла льда и структурных связей внутри его представительного объема как поликристаллического агрегата.

Учитывая сложную структуру льда и его текстуру в реальном состоянии, энергия активации процесса его разрушения, являясь некоторой среднестатистической величиной, отражает и энергию связей, и статистический характер их распределения, и подчас сложную кинетику процесса, и она всегда будет меньше энергии межатомной связи. По механизму образования микротрещины во льду хрупкое и вязкое разрушения энергетически между собой не отличаются – в обоих вариантах происходит разрыв связей в решетке зерна и в структуре поликристаллический конгломерата (в отличие от вязкопластичности).

В комплексном механизме деформирования льда с позиций энергетического подхода к процессу его разрушения (рис. 3*а, б*) [19] достижение критического уровня плотности упругой энергии в объеме льда либо вызывает его разрушение, либо является началом процесса текучести (упруго-идеальнопластический процесс) (рис. 3*б*), или началом трещинообразования (упруго-пластическое деформирование), или триггером мгновенного «сброса» напряженного состояния на вновь образованные поверхности частей разрушенного тела (упруго-хрупкий процесс (рис. 3*а*).

Учитывая неопределенное разнообразие типов (механизмов) и неодновременность зарождения и протекания стохастического процесса разрушения представительного объема льда (RVE) в контактной зоне ЛП с МЛО, согласно теории Бишопа – Хилла [29] о пластическом формоизменении монокристаллов, полная работа, единовременно затрачиваемая внешними силами по сжатию поликристаллического агрегата, равна сумме работ, совершаемых над отдельными кристаллами в агрегате, чтобы все зерна испытали микродеформации, равные макроскопической деформации поликристаллического представительного объема льда, обладающего свойствами всего его массива.

Поэтому задача математического описания протекания процессов деформирования разномасштабных объемов в некоторой напряженной зоне всех иерархических уровней пространства ЛП в конкретный момент времени априори может быть реализована только с применением объемного энергетического критерия разрушения льда, интегрирующего весь комплекс затраченных на разрушение работ, опираясь на свойство пространственной инвариантности (скалярности) и аддитивности энергии в отличие от векторности силового и деформационного критериев [30].

3. Применение энергетической модели взаимодействия ледового поля с морскими ледостойкими объектами

Необходимость одновременного рассмотрения процессов, происходящих на всех масштабных уровнях ЛП, очевидна, поскольку при его движении с постоянной скоростью некоторая часть кинетической энергии постоянно и «порционно» затрачивается на работу по разрушению льда разных масштабных зон.

Для адаптации теоретической модели разрушения льда на контакте ЛП с МЛО к ее применению в проектной практике описанный выше комплексный подход к рассмотрению явления многоуровневого разрушения льда обоснован, главным образом, результатами корректно поставленных и проведенных тщательно обработанных полунатурных экспериментов по динамическому разрушению блоков льда и лабораторных экспериментов по одноосному динамическому сжатию больших образцов натурного морского льда [18, 19].

Для получения расчетных параметров цикличности процесса контактного разрушения льда принята гипотеза об аналогии механизмов разрушения льда и статистических параметров их стохастических процессов в натурном и в моделируемом процессах, которые исследуются на отобранных в регионе проекта больших образцах льда [18, 20]. Основные параметры натурного процесса взаимодействия элементов системы ЛП – МЛО показаны на рис. 1*а*, макет записи стохастического процесса разрушения образца льда приведен на рис. 4. Количественной характеристикой обмена кинетической энергией в процессах разрушения льда является частое отделение значения энергии ΔU, затрачиваемой на значение разрушенного объема W льда (или его массы с плотностью ρ).

Согласно нашим исследованиям [18–20], процесс разрушения льда на контакте имеет две фазы

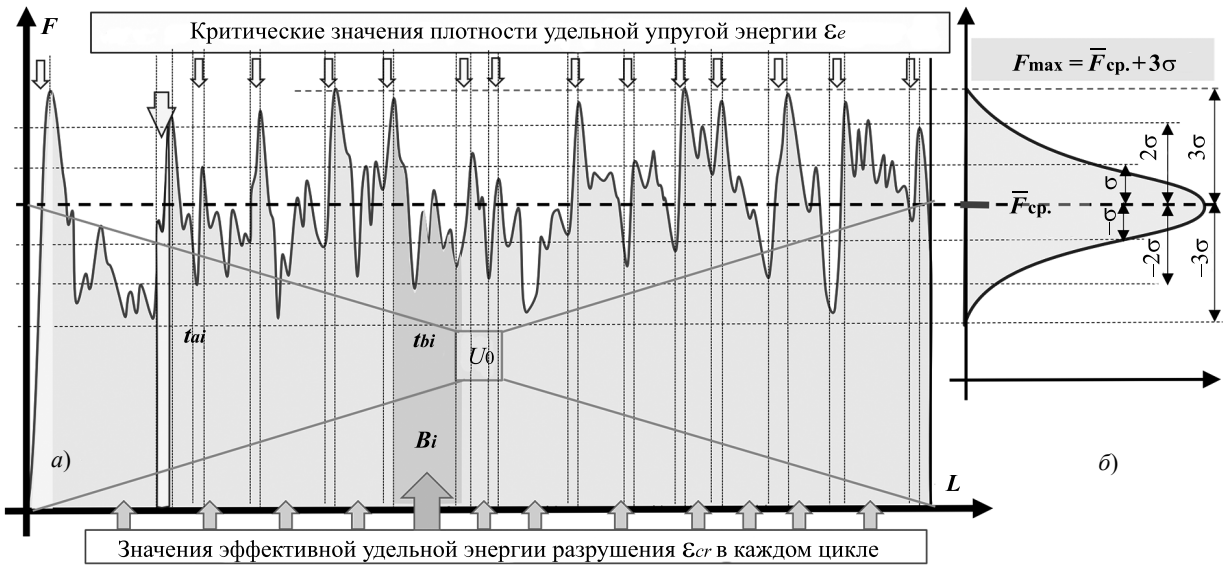


Рис. 4. Запись силы давления на образец при его испытании на динамическое сжатие, аналогичная по виду и содержанию с записью силы контактного взаимодействия ледового поля с морскими ледостойкими объектами по содержанию записи силы: *а*) зонирование распределения энергии ледового поля, затрачиваемой на разрушения льда; *б*) параметры области прорезания ледового поля опорой морского ледостойкого объекта

(рис. 4*а*): сначала очередной слой неразрушенного льда (участки осциллограммы типа A_i) подвергается упругому сжатию и разрушается при достижении в его объеме предельной плотности упругой энергии $\varepsilon_{e,i}$, запускающей процесс его хрупкого разрушения на блоки и осколки разных размеров. В более длительный период типа B_i второй фазы разрушения этого же слоя льда имеет место упругопластический характер процесса: блоки и крупные осколки дробятся на мелкие, которые сминаются, и крошка льда выдавливается из зоны контакта. Этот процесс характеризуется частными эффективными значениями достигнутых удельных энергий $\varepsilon_{cr,i}$.

Значения удельной энергии хрупкого разрушения слоя $\varepsilon_{e,i}$ в несколько раз превышают значения частных удельных энергий «доразрушения» того же слоя $\varepsilon_{cr,i}$. Процесс повторяется при одновременно-последовательном проявлении на площади контакта сдвигов и раздавливания со случайными периодами A_i *и* B_i и с характерными для них, но разными по природе и величине значениями $\varepsilon_{e;i}$ и $\varepsilon_{cr;i}$. Текущая частота разрушения льда $f_i = 1/\Delta t_i$ будет различаться на каждом отрезке продвижения ЛП, движущегося с постоянной скоростью $V_{ЛП} = dL_i/dt_i$. В эксперименте соотношения совпадающие параметры процесса аналогичны, поэтому расчетную частоту проявления пиковых значений ледовой нагрузки f_{cr} можно определить только методом спектрального анализа значений цифрового ряда записи процесса разрушения большого образца льда при его динамическом сжатии (или записи натурного процесса).

Для расчетов параметров цикличности процесса разрушения льда следует принимать интегральное значение удельной энергии послойного циклического разрушения льда как средневзвешенное значение ее критических значений в течение всего расчетного периода процесса – ε^*_{cr} по результатам математической обработки цифровой записи процесса разрушения большого образца льда диаметром d на высоту h_o (аналогичному процессу разрушения льда на глубину L при взаимодействии ЛП с МЛО диаметром D). Формула определения эффективной плотности удельной энергии разрушения льда для натурного и модельного процессов записывается в виде (рис. 1*а* и 4*б*)

$$\varepsilon^*_{cr} = \frac{\Delta U_{ЛП}}{D \cdot L \cdot h \cdot \rho} = \frac{4U_0}{\pi \cdot d^2 \cdot h_0 \cdot \rho}. \qquad (1)$$

Таким опытным путем может быть получено эффективное значение энергетического критерия объемного разрушения морского льда – эффективная удельная энергия механического разрушения льда ε^*_{cr}, интегрально учитывающая и описываю-

щая все виды его разрушения с учетом феноменологических свойств в реальном физическом состоянии и аналогичных реальным условиям, при которых протекает процесс разрушения.

Кинетическое описанием процесса затрат энергии ЛП на разрушение льда в зоне контакта с поверхностью опоры МЛО основывается на законе сохранения энергии, т.е. на равенстве скорости изменения энергии ЛП ($\Delta U_{ЛП}/dt$) в процессе его контактного взаимодействия с поверхностью опоры сооружения и мощности, затрачиваемой на разрушение льда энергии, эквивалентной работе осредненной силы $\overline{F_{ЛП}}$, затраченной на прорезание ЛП на глубину ΔL. С учетом обозначений на схеме взаимодействия ЛП с МЛО (рис. 1*а*) условие энергетического равновесия для натурного процесса взаимодействия запишется в виде:

$$\Delta U_{ЛП}/dt = \left(\overline{F_{ЛП}}(t)\cdot\Delta L(t)\right)\Big/dt. \quad (2)$$

Среднее значения контактной силы $\overline{F_{ЛП}}$ для натурных условий необходимо определять с учетом экспериментально полученного значения ε^*_{cr} и комплекса нормативных коэффициентов k*, учитывающих начальные условия контакта по формуле:

$$\overline{F_{cr}} = k^*\cdot D\cdot h\cdot\rho\cdot\varepsilon^*_{cr}. \quad (3)$$

Максимальное значение пиков ледовой нагрузки на морской объект (контактной ледовой силы) определяется с учетом нормативных требований и класса объекта по среднему значению контактной силы (3) с добавлением требуемых значений среднеквадратичных отклонений, определяемых по кривой плотности вероятности нормального распределения в модельном процессе текущих значений «модельной» силы (рис. 4*б*), или из обработки данных натурного процесса:

$$F_{\max} = \overline{F}_{ср.} + (2\div 3)\sigma. \quad (5)$$

Заключение

В данном исследовании для построения универсальной энергетической модели разрушения морского льда (как для микро-, так и для мезо- и макроструктурных уровней) представлены теоретическое и эмпирическое обоснования применения единой энергетической концепции описания комплексного процесса разрушения единовременно на всех иерархических уровнях массива ледового поля.

Показано, что энергетическая модель разрушения льда интегрально описывает все явления процесса деформирования и разрушения его сжатого объема затратами упруго накопленной в нем энергии и позволяет получать требуемые нормами параметры цикличности динамического процесса взаимодействия ЛП с МЛО в качестве значений исходной нагрузки для выполнения динамического расчета конструкции объекта. Представленная модель с учетом опубликованных автором ранее результатов ее валидации является основанием для номинации на нормативную и применения в практике прогнозирования расчетных параметров цикличности ледовых нагрузок на МЛО.

Список использованной литературы

1. *Andrianopoulos N.P., Manolopoulos V.M.* Elastic strain energy density decomposition in failure of ductile materials under combined torsion-tension // International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2014. Vol. 9:16 P. 3–12. URL: http://www.springer.com/40712/content/9/1/16 (дата обращения: 20.04.2024).
2. *Basan R., Marohnić T.* Constitutive modeling and material behavior. Interim Report. RIJEKA, 2016. URL: http://www.riteh.uniri.hr/media/filer public/c7/b4/c7b4b975-9474-4b66-a04f-ff3597ba61e7/d711 constitutive modeling and material behavior interim report.pdf. 18.03.2024 (дата обращения: 20.04.2024).
3. *Daley C.G.* Sea Ice Engineering, theory and application. Memorial University of Newfoundland St. John's, Canada, 2017. 154 p. URL: https://www.academia.edu/11567885/Sea_Ice_Engineering. 18.03.2024 (дата обращения: 20.04.2024).
4. Quantitative Analysis of the Geometrically Representative Volume Element of the Yellow River's Granular Ice Microstructure during the Freezing Period / *Y. Deng, J. Wang, J. Zhou, P. Zhang* // Crystals. 2023. Vol. 13(7). P. 1021. DOI: 10.3390/cryst13071021. 13.03.2024.
5. *Derradji-Aouat, A.* Multi-surface failure criterion for saline ice in the brittle regime // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36(1–3). P. 47–70. DOI: 10.1016/s0165-232x(02)00093-9. 13.03.2024.
6. An elastic-plastic ice material model for ship-iceberg collision simulations // *Y. Gao, Z. Hu, J.W. Ringsberg, J. Wang* // Ocean Engineering. 2015. Vol. 102. P. 27–39. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.047. 13.03.2024.
7. Numerical Simulation of Ice Action to a Lighthouse / *A. Gürtner, M. Bjerkås, W. Kühnlein* [et al.] // Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Honolulu, Hawaii, 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/268295189_Numerical_Simulation_of_Ice_Action_to_a_Lighthouse (дата обращения: 13.03.2024).

8. *Hallam S.D., Duval P., Ashby M.F.* A study of cracks in polycrystalline ice under uniaxial compression // Le Journal de Physique Colloques. 1987. Vol. 48. P. 303–311. DOI: 10.1051/jphyscol:1987143 13.03.2024. 13.03.2024.
9. *Islam M., Mills J., Gash R.* A literature survey of broken ice-structure interaction modelling methods for ships and offshore platforms // Ocean Engineering. 2021. Vol. 221. P. 108527. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108527 (дата обращения: 13.03.2024).
10. *Kim E., Tsuprik V.G.* The Concept of Specific Energy of Mechanical Destruction of Ice versus the Ice Pressure-Area Relationship: Review and Discussion // Proceedings of the 24th IAHR International Symposium on Ice. Vladivostok, 2018. URL: https://www.iahr.org/library/infor?pid=26924 (дата обращения: 20.03.2024).
11. *Kim E., Amdahl J., Løset S.* Development of ice failure and yield criteria for accidental limit state design // Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'11). Montreal : National Research Council of Canada, 2011. P. 98–109. URL: https://www.researchgate.net/publication/286023527. (дата обращения: 20.03.2024).
12. *Kolari K.* A complete three-dimensional continuum model of wing-crack growth in granular brittle solids // International Journal of Solids and Structures. 2017. Vol. 115. P. 27–42. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.02.012.
13. *Kolymbas D.* Constitutive Modelling of Granular Materials // The misery of constitutive modelling. (Chapter 1). 2000. P. 11–24. DOI: 10.1007/978-3-642-57018-6_1.
14. *Palmer A.C., Sanderson T.J.O.* Fractal Crushing of Ice and Brittle Solids // Proceedings: Mathematical and Physical Sciences. 1991. Vol. 433, No. 1889, P. 469–477. URL: http://www.jstor.org/stable/51914 (дата обращения: 13.03.2024).
15. Fracture and its role in determining ice forces on offshore structures / *A.C. Palmer, D.J. Goodman, M.F. Ashby* [et al.] // Annals of Glaciology. 1983. Vol. 4. P. 216–221. DOI: 10.3189/S0260305500005504.
16. *Schulson E.M.* The structure and mechanical behavior of ice // JOM. 1999. Vol. 51. P. 21–27. DOI: 10.1007/s11837-999-0206-4.
17. *Schulson E.M., Hibler W.D.* Fracture of the winter sea ice cover on the Arctic ocean // Comptes Rendus Physique. 2004. Vol. 5(7). P. 753–767. URL: https://sci-hub.ru/10.1016/j.crhy.2004.06.001(дата обращения: 13.03.2024).
18. 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* // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC17-155), Busan, Korea, 2017. P. 1–14. URL: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85037331561&partnerID=MN8TOARS (дата обращения: 13.03.2024).
19. *Tsuprik V.G.* Substantiations Use of the Specific Energy Ice Destruction for Calculation the Cyclic Ice Load Parameters to Sea Structures // Proceedings of the International Science and Technical Conference "EarthScience", IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459(3). P. 032074, 12 p. DOI: 10.1088/1755-1315/459/3/032074.
20. Tsuprik V.G. The Fracture Laws of Ice Edge in its Interaction with the Shaft Surface of the Structure. Proc. of the XXV International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE). Kona, Hawaii Big Island, USA, 2015. P. 1803–1808. URL: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84944677321&partnerID=MN8TOARS. (дата обращения: 13.03.2024).
21. *Tuhkuri J., Polojarvi A.* A review of discrete element simulation of ice-structure interaction // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2018. Vol. 376 (2129), 20170335. DOI: 10.1098/rsta.2017.0335.
22. Drucker-Prager yield criteria in Viscoelastic-Plastic constitutive model for the study of sea ice dynamics / G. Wang, Sh.-Y. Ji, H.-X. Lv, Q.-J. Yue // Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 18(6), P. 714–722. DOI: 10.1016/s1001-6058(07)60011-0.
23. Nonlinear viscoelastic-plastic material modelling for the behaviour of ice in ice-structure interactions / *Y. Xu, Z. Hu, J.W. Ringsberg, G. Chen* // Ocean Engineering. 2019. Vol. 173. P. 284–297. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.12.050.
24. *Yu B., Low Y.M.* A phenomenological model for simulating ice loads on vertical structures incorporating strain rate-dependent stress-strain characteristics // Applied Mathematical Modelling. 2022. Vol. 101. P. 132–156. DOI: 10.1016/j.apm.2021.07.021. 13.03.2024.
25. *Zhang W., Li J., Li L., Yang Q.* A systematic literature survey of the yield or failure criteria used for ice material // Ocean Engineering. 2022. Vol. 254. P. 15. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111360.
26. *Макаров О.А., Беккер А.Т., Гоголадзе Д.З.* Анализ конститутивных моделей пластичности применительно к численному моделированию ледовых воздействий // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2020. № 2(43). С. 141–154. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-2-15.
27. *Санников А.В., Миряха В.А., Петров И.Б.* Численное моделирование экспериментов по исследованию прочностных характеристик льда // Полярная механика: материалы Третьей междунар. науч. конф. Влади-

восток : Дальневост. федерал. ун-т, 2016. С. 141–151. URL: https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/5bc/PolarMechanics.pdf. (дата обращения: 13.03.2024).

28. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей : [практическое пособие] / Гос. науч. центр РФ Арктический и антарктический науч.- исслед. ин-т ; *под ред. В.Г. Смирнова.* Санкт-Петербург : ААНИИ, 2011. 238 с. URL: http://old.aari.ru/misc/publicat/sources/Smirnov_VG_2011.pdf. (дата обращения: 13.03.2024).
29. *Трусов П.В., Келлер И.Э.* Теория определяющих соотношений. Ч.II. Некоторые современные теории пластичности. Пермь : Перм. гос. техн. ун-т, 1999. 108 с. URL: http://cph.phys.spbu.ru/ACOPhys/materials/trusov/part2. pdf. (дата обращения: 13.03.2024).
30. *Цуприк В.Г.* Динамические ледовые нагрузки на сооружения континентального шельфа. Дальневосточный федеральный университет. Владивосток : Издательство Дальневост. федерал. ун-та, 2023. 322 с. DOI: 10.24866/7444-5500-2.
31. *Шапиро Г.С.* Об уравнениях деформирования льда // Механика и физика льда : сб. ст. АН СССР. Москва : Наука, 1983. С. 164–166. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01001171643 (дата обращения: 20.03.2024).

Сведения об авторе

Цуприк Владимир Григорьевич, д.т.н., доцент, профессор департамента морских арктических технологий Политехнического института ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет». Адрес: 690922, Россия, Приморский край, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10. E-mail: tsuprik.vg@dvfu.ru.

Поступила / Received: 14.05.24
Принята в печать / Accepted: 27.06.24
© Цуприк В.Г., 2024