

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ: СТРОИТЕЛЬСТВО

Гидротехническое строительство

DOI.org/10.5281/zenodo.896998

УДК 539.42: 551.326/620.178.7

В.Г. Цуприк

ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ ЦУПРИК – к.т.н., заведующий кафедрой строительных конструкций и материалов Инженерной школы, e-mail: vg\_tsuprik@mail.ru

*Дальневосточный федеральный университет*

Суханова ул. 8, Владивосток, 690091

## О механизме генерации циклической ледовой нагрузки на шельфовые сооружения от разрушения льда (обзор)

**Аннотация:** Особенностью явления взаимодействия ЛП–МЛЮ является циклическое разрушение льда на поверхности опоры сооружения, периодичность которого связана с механизмом накопления упругой энергии в напряженном массиве льда и одновременном упругом отклонении сооружения от равновесного положения. Максимальное значение ледовой нагрузки, вызывающее максимальное отклонение сооружения от равновесного положения, возникает в момент разрушения льда, поэтому частота таких разрушений является частотой колебаний сооружения, вызываемых дрейфующим ледовым полем. Возможность резонанса сооружения с частотой разрушения льда приводит к увеличению отклонений сооружения, создавая сложности эксплуатации сооружения, снижая его надежность и, в конечном итоге, долговечность. Предлагаемые современными исследователями методы использования в расчетах циклической нагрузки в качестве критерия прочности кубиковой прочности льда не укладываются в каноны прочностных расчетов, основанные на силовом подходе теории упругости, поскольку в существующих методах расчета нагрузки отсутствует фактор времени, следовательно, не учитываются такие параметры, как работа и мощность разрушения льда. В качестве теоретической модели, связывающей накопление повреждаемости и разрушение льда с изменением его состояния в энергетическом фазовом пространстве, предлагается использовать энергетический подход. Использование удельной энергии механического разрушения льда в расчетах морских ледостойких оснований на ледовую циклическую нагрузку представляется более обоснованным и целесообразным. Показана возможность разработки модели на основании математического описания механизма преобразования кинетической энергии ледового поля в энергию упругих отклонений сооружения и в энергию, затрачиваемую на разрушение льда.

**Ключевые слова:** шельфовые сооружения, вибрация, морской лед, разрушение льда, циклическая нагрузка, удельная энергия разрушения.

### Введение

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

© Цуприк В.Г., 2017

О статье: поступила: 04.09.2017; финансирование: бюджет ДВФУ.

Первыми исследователями, которые начали изучать эту проблему, были Peyton [51] и Vlenkarn [18], обнаружившие и исследовавшие эти явления на реальном морском основании платформы в заливе Кука. В то же время получены записи «пилообразной» ледовой нагрузки на опоры железнодорожных и автомобильных мостов [6, 47, 53] и водопропускных сооружений на плотинах [6], а также активно проводились исследования вибрации морских маяков в Ботническом заливе [22, 23, 42, 43]. Начало этих исследований связано с тем, что здесь в 1966 г. был сдвинут льдом и разрушен маяк Tainio (Finland) [16]: кессон маяка сдвинулся на 14 м по несвязному основанию и опрокинулся, когда основание уперлось в скальный выступ. В 1969 г. под действием дрейфующих ледовых полей был разрушен маяк Nygran (Sweden) [16]. Башня маяка диаметром 2,5 м разрушилась на глубине 1 м ниже уровня моря, но основание маяка не было сдвинуто. В 1974 г. произошел излом маяка Kemi I (Finland) в верхней части в результате сильной вибрации [42], в эти же годы был разрушен и маяк Кемпи II. В 1977–1979 гг. на шельфе Азовского моря получило повреждение от натиска льда строящееся железобетонное основание буровой платформы в виде многогранника диаметром 8 м [1]. Известны и другие случаи разрушения морских маяков на малых глубинах, в том числе основания маяка ВМФ СССР на банке «Таллинна–Мадал» на глубине 10 м в створе Таллин–Хельсинки, сдвинутого и разрушенного льдами в марте 1961 г.

Разрушение стальной нефтедобывающей платформы в Бохайском заливе (КНР) в 1977 г. от усталостных напряжений, возникавших от циклической ледовой нагрузки, заставило ученых и проектировщиков срочно заняться изучением этой проблемы на самом серьезном уровне [63, 64, 66] с привлечением ведущих исследователей-ледотехников Европы и Канады. Конкретный анализ динамического воздействия ледовых полей на платформы сквозного типа показал, что спектральная плотность выхода (перемещения, напряжения) носит «многогорбый» характер (чаще всего их три), и один из таких «горбов» (чаще всего второй) совпадает с собственной частотой колебаний платформ [35], что создает условия для повышения амплитуд упругого отклонения конструкции основания платформы и со временем приводит к усталостному разрушению ее элементов. Кроме того, при этом создаются недопустимые условия жизнедеятельности обслуживающего персонала платформы [39].

Отрицательное влияние динамического взаимодействия льда на морские сооружения оказалось характерным не только для оснований маяков на кессонах и гибких конструкций с небольшими поперечными размерами их опорных частей, обладающими явными динамическими характеристиками. Зимой 1985–1986 г. платформа Molikraq, имеющая кессон массой в 54 000 т и габариты 111x111 м<sup>2</sup> в основании и установленная в море Бофорта, была подвергнута воздействиям дрейфующего поля многолетнего льда размером 1x2 км [33, 59]. Из анализа ситуации специалистами было установлено [7], что в результате вибрации с частотой 0,5–3 Гц, вызванной разрушением льда в течение 30-минутного контакта, платформа получила критическое состояние, близкое к потере устойчивости на сдвиг по поверхности грунта основания. Поровое давление в песчаном ядре основания повысилось, и это привело к его разжижению, поэтому несущая способность основания под кессоном достигла критической минимальной величины. В то время такие результаты были неожиданными для специалистов. И в последние годы проектировщики и строители нефтяных платформ на шельфе Сахалина также столкнулись с проблемой цикличности нагрузки и обеспечения прочности оснований этих уникальных сооружений [3].

Практика эксплуатации отдельно стоящих морских ледостойких оснований (МЛО) при воздействии на конструкции дрейфующих ледовых полей (ЛП) показала, что источником возникновения потенциально опасной вибрации этих сооружений является процесс разрушения льда на контакте кромки дрейфующего ледового поля и сооружения. Такие ледовые нагрузки могут привести к выводу сооружения из эксплуатации и даже к его разрушению, поэтому их необходимо рассчитывать на динамические нагрузки от циклического разрушения льда на поверхности опор сооружения.

Российские нормы не дают рекомендаций по расчету динамического воздействия льда, а рекомендации международных норм касаются лишь предложений выбора направления рассмотрения проблемы. Изучение многих аспектов рассматриваемой проблемы ведется уже более пятидесяти лет, но, как отмечали некоторые ведущие исследователи в конце XX и в начале XXI века [24, 34, 65], *многие детали процесса взаимодействия сооружения со льдом, которые приводят к возникновению вибрации, пока еще не разработаны до уровня их использования в проектной практике.*

Современные исследователи указывают на то, что основной механизм появления некоторых деталей процесса полностью не понятен до настоящего времени и требуется продолжение его исследований [48, 50, 57]. В то же время неизбежность перехода к освоению больших глубин и растущая необходимость увеличения размеров (и массы) надводной части платформ значительно *усиливают влияние фактора цикличности нагрузок* от разрушения льда не только на общую прочность, но и на *предельную усталостную прочность элементов конструкций платформ, определяющих их долговечность.* С такой проблемой столкнулись проектировщики оснований морских ветрогенераторов в ряде районов Балтийского моря [14, 67]. Это, в частности, объясняет тот факт, что исследования, посвященные возникновению и развитию вибрации сооружений при действии льда, продолжают расширяться и углубляться.

*Актуальность данной проблемы*, следовательно, обусловлена, во-первых, перспективами развития освоения шельфовых акваторий с наличием льда в промышленных целях, во-вторых – отсутствием решения проблемы на уровне нормативных документов, обеспечивающих гарантии безопасности и долговечности проектируемых сооружений для шельфов ледовитых морей при воздействии на их основания циклической ледовой нагрузки. Вскрытая актуальность проблемы приводит к постановке *цели* данного исследования как выявления, описание и предложение количественных параметров, определяющих закономерности возникновения и существования цикличности ледового воздействия ледовых полей на МЛО.

### **Экспериментальные исследования явления цикличности ледовой нагрузки**

Первыми зафиксированными колебаниями морской платформы от воздействия движущегося ледового покрова были записи, выполненные R. Peuton в заливе Кука на Аляске [51]. Было отмечено, что пилообразный характер колебаний платформы с четырьмя цилиндрическими колоннами диаметром 91 см при прорезании ими ледовых полей, имеющих скорость дрейфа от 0,5 до 2,1 м/с при постоянных толщине и температуре льда, обусловлен актами его контактного разрушения от сжатия. Измерения показали, что частота изменения ледовой нагрузки при медленном движении поля составляла 1,0 Гц, что совпадало с собственной частотой сооружения. Исходя из этого R. Peuton сделал ошибочный вывод о том, что частота пиков ледовой нагрузки зависит от свойств льда, но *является постоянной для всего спектра собственных частот сооружения.*

Результаты подобных исследований, проводившихся на тех же платформах в заливе Кука с помощью калиброванных тестовой сваи и измерительной балки, оборудованных тензометрическими датчиками (К.А. Vlenkarn [18]), показали повышение значений ледовой нагрузки и амплитуды колебаний сооружения *при определенных сочетаниях толщины льда и скорости дрейфа* ледовых полей (рис. 1). Здесь сила внешнего воздействия льда на опору представлена как функция относительной скорости движения опоры и льда  $P = f(V_{\text{лп}} - \dot{X})$ . К.А. Vlenkarn [18] *впервые* высказал предположение о том, что в процессе взаимодействия ледового поля и сооружения они могут рассматриваться как *автоколебательная система.* При возникновении *автоколебаний* возможна ситуация, которая *приведет к возникновению резонанса частот разрушения льда с частотой собственных колебаний сооружения и возрастанию амплитуды его колебаний.* Кроме того, в этой работе было введено понятие «негативного» трения, которое рассматривалось как причина возникновения автоколебаний опоры во льду, а также дана первая оценка этой величины.

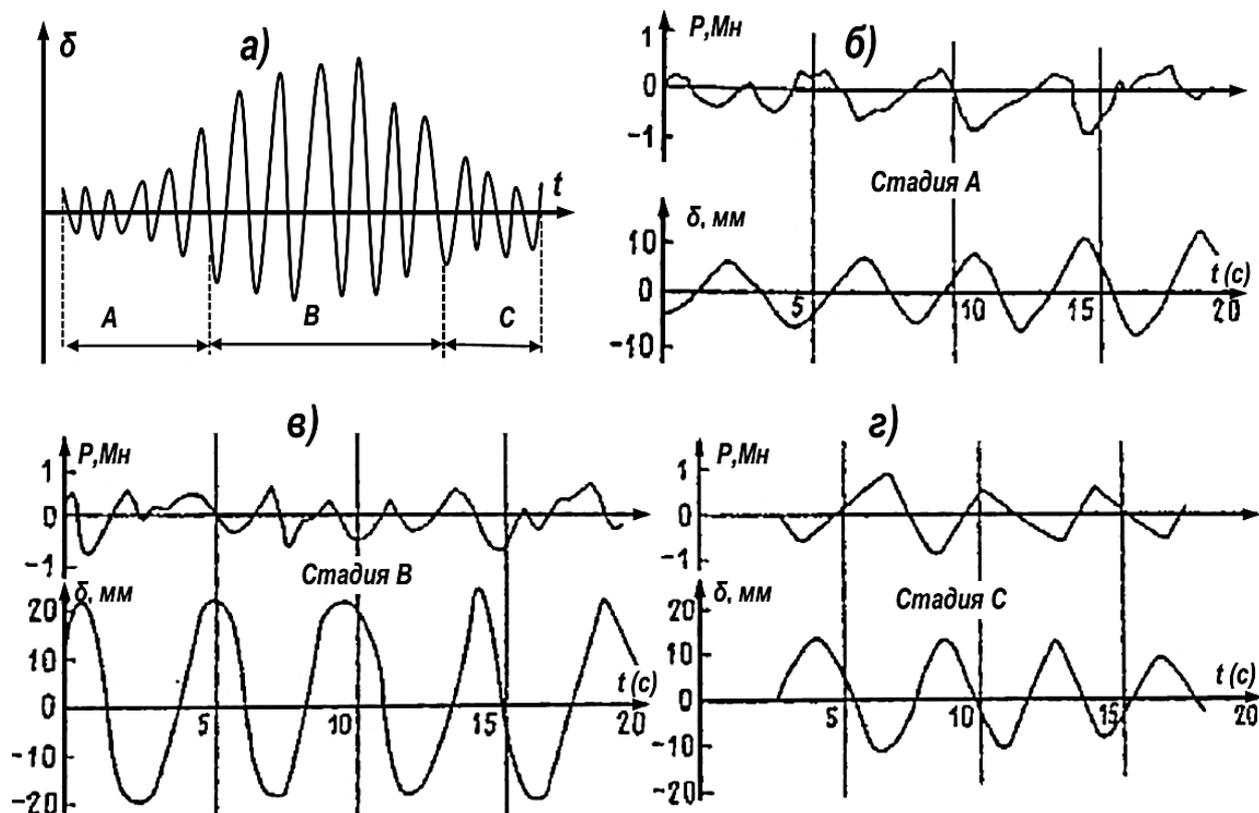


**Рис. 1.** Записи сил давления льда на реальные сооружения по К.А. Blenkarn [18].

Таким образом, уже в первых натуральных полномасштабных исследованиях взаимодействия ледовых полей с сооружениями было выявлено, что эти объекты могут рассматриваться как *система*, а полученные в [18, 51] данные дают основания предполагать *возможность возникновения резонанса собственной частоты колебаний платформы с частотой автоколебаний, генерируемых системой* ЛП–МЛЮ, что приведет к росту амплитуды отклонений МЛЮ (огнивающие размаха амплитуд на рис. 1). В последующие годы натурные эксперименты по исследованию различных аспектов рассматриваемой проблемы проводились рядом исследователей в различных регионах мира с использованием навесных тензометрических панелей, акселерометров, наклономеров, сейсмографов и пр. Это дало возможность получить записи детального распределения контактного давления льда по всей площади контакта, исследовать функциональные зависимости пиковых значений ледовой силы и частот их появления от факторов, определяющих характер процесса взаимодействия опоры и ледового поля. Такие технологии использовались на сооружениях в Ботническом и Бохайском заливах, на платформе Моликпак в море Бофорта и на Сахалине.

Большой объем данных по исследованиям ледовых сил, вызывающих вибрацию маяков в Ботническом заливе, приводится в работах М. Мäättänen [42, 43] и А. Engelbrektson [22, 23]. Результаты обширных многолетних измерений давления льда на кессоны маяков, выполненных этими исследователями, показали, что частота пиков силы давления льда на сооружения, характер воздействия и численные значения силы определяются в основном скоростью дрейфа полей льда, видом разрушения льда, который зависит от его прочности и скорости дрейфа ледовых полей. На рис. 2 приводится пример записи колебаний ледовых нагрузок на маяк Norströmsgrund в Ботническом заливе и его деформаций, выполненный А. Engelbrektson [22]. Маяк в виде колонны диаметром 4,4 м при высоте 43 м с основанием кессона 23 м и шириной 10 м по верху установлен на глубине 16 м. В одном из событий взаимодействия запись воздействия ледового поля с толщиной льда 30 см, дрейфующего со скоростью 0,1 м/с, производилась в течение 40 с. За этот период времени скорость ледового поля возрастала, и были выявлены три характерные стадии колебательного процесса: стадия А (10–12 с) – нарастание амплитуды колебаний; стадия В (14–16 с) – колебания в резонансном режиме с постоянной амплитудой; стадия С (28–30 с) – затухание колебаний. Следует отметить, что такие стадии развития процессов взаимодействия всегда подтверждаются как в натуральных, так и в лабораторных исследованиях других ученых.

Наряду с исследованиями процесса взаимодействия дрейфующих ледовых полей с реальными морскими сооружениями проводились обширные экспериментальные исследования по изучению этого процесса на моделях в ледовых бассейнах. Первыми экспериментами по исследованиям взаимодействия ледяного поля с моделью сооружения, выполненными *в лабораторных условиях на моделированном льду*, были эксперименты В.П. Афанасьева и др. [2], выполненные в ледовом бассейне ААНИИ. Они показали, что с увеличением ширины сооружения контактное давление льда снижается, а *характер его разрушения определяется двумя факторами: прочностью льда и скоростью движения модели.*



**Рис. 2. Записи ледовых нагрузок на кессон маяка и его деформаций по Engelbrektson [22]: а – развитие процесса взаимодействия; б–г – характерные стадии колебательного процесса.**

В отличие от выводов К.А. Blenkarn [18], М. Мäättäнен [41] и А. Engelbrektson [22, 23], в работе D. Sodhi et al. [55] в разработке модели разрушения льда на контакте с опорой был предложен *другой подход*. Выводы авторов этого исследования основаны на результатах обширных лабораторных экспериментов при испытаниях моделей свай на ледовую нагрузку диаметром 50÷500 мм при толщинах льда 50÷80 мм и скоростях движения моделей в пределах 10÷210 мм/с. Здесь [55], опираясь на полученные результаты, авторы предлагают рассматривать возникновение резонансных колебаний податливых сооружений как *результат действия на них ледового поля с частотой, характерной для разрушения льда*, т.е. как «принудительные» колебания, вызываемые внешней динамической нагрузкой случайного спектра. Дискуссия о принадлежности вида колебаний морских сооружений под действием льда к автоколебаниям или к вынужденным колебаниям продолжалась более 50 лет в силу сложности этого явления, а также сложностей получения однозначных экспериментальных подтверждений той или другой гипотезы.

Но в последние годы все большее число ученых считают это явление «самовозбуждающимися колебаниями сооружения при действии льда» («The phenomenon of self-excited ice-induced structural vibrations»), т.е. «классическими» автоколебаниями в системе ЛП–МЛЮ. Такие выводы основываются на результатах ряда обширных и глубоких экспериментальных исследований, выполненных в последние десятилетия как в лабораториях, так и в натуральных условиях [5, 14, 21, 25, 30, 34, 39–41, 44, 49, 54–57, 63–67]. Характерным для этого периода являются комплексные полномасштабные исследования взаимодействия ледовых полей с буровыми платформами ферменного типа, а также типа «монопод», установленными в Бохайском заливе [63, 64, 66]. Здесь в конце прошлого–начале текущего столетия международной группой исследователей в течение ряда лет проводилась одновременная фиксация изменений во времени силы воздействия льда, его скорости и перемещений сооружения. Авторы этих исследований пришли к заключению, что контактная сила должна быть

функцией относительного смещения сооружения и относительной скорости между ним и кромкой ледового поля. Кроме того, в уравнении движения сооружения не должно быть времени как явной переменной [66]. На рис. 3 приведен фрагмент из работы [64] – записи колебаний исследуемого сооружения, генерируемых дрейфующим ледовым полем при периодическом разрушении льда. Синхронные с пиками силы перемещения конструкции платформы говорят об установившемся процессе: колебаниях сооружения синхронно с частотой разрушения льда, т.е. о резонансе в системе ЛП–МЛО.

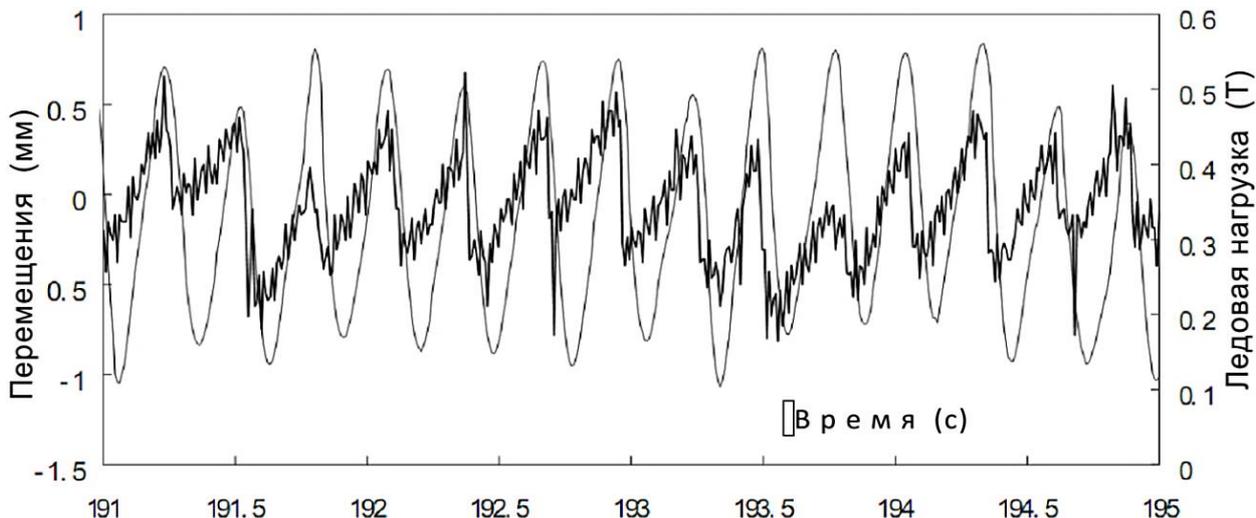


Рис. 3. Запись ледовых нагрузок (утолщенная линия) на опору сооружения типа «монопод» и его перемещений при циклическом разрушении льда по Yue Q. и др. [64] в режиме автоколебаний.

Основываясь на анализе экспериментальных исследований ряда авторов [4, 11, 19, 26, 29, 37, 45, 52, 58] и на результатах экспериментов, выполнявшихся в 1978 г. на льду Амурского залива [13], нами была разработана блок-схема выбора расчетной формулы для максимальной ледовой силы для трех возможных типов разрушения льда при взаимодействии ледового поля с опорой сооружения (рис. 4, а).

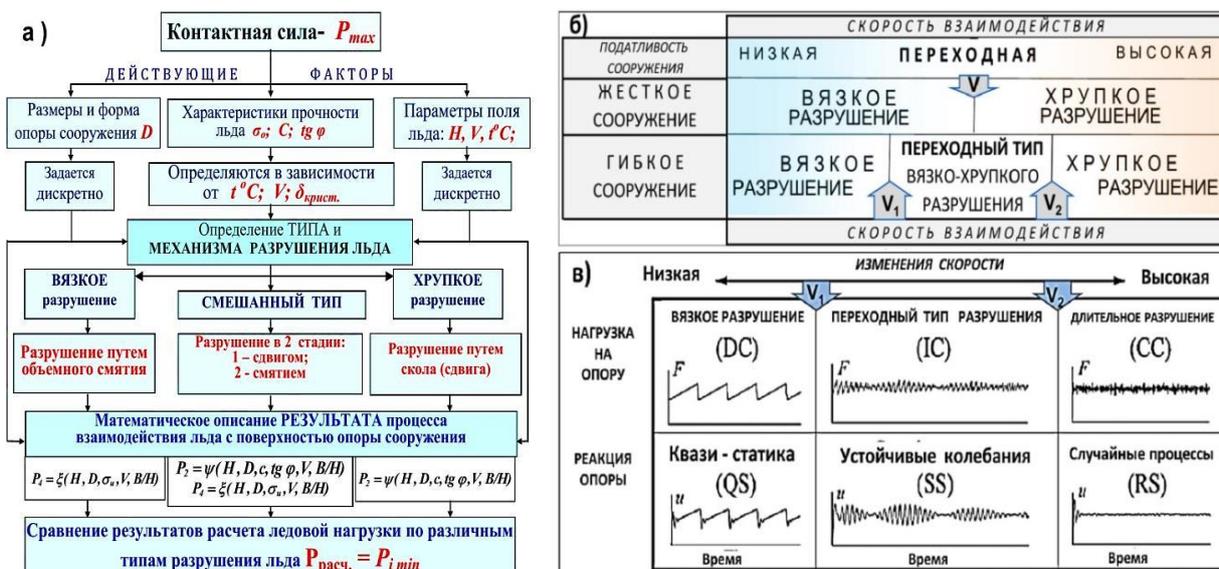


Рис. 4. Схемы смены типа разрушения льда на опоре в зависимости от условий взаимодействия: а – по: Храпатый и Цуприк [11, 13]; б – по Sodhi [56] для жесткого и подвижного сооружения; в – вид реакции модели для различных типов разрушения льда по Bjerkås и др. [17].

В приложении к сооружениям различной жесткости на основании лабораторных экспериментов, в том числе выполнявшихся и другими исследователями, Sodhi [56] в 2001 г. представил концептуальную схему появления вязкопластичного (DC), хрупкого (CC) и переходного вязко-хрупкого (IC) типа разрушения льда в зависимости от сочетания нескольких факторов, определяющих тип этого сложного физико-механического процесса (рис. 2, б).

Границы между DC, IC и CC определяются скоростями перехода ( $V_1$  и  $V_2$ ), при этом степень влияния прочности льда на переходы от одного типа разрушения к другому авторами конкретно не оговаривается. Подход, разработанный Sodhi [56], был использован Bjerkås с соавтором [17], исследовавшими причины разрушения маяка Norströmsgrund от действия льда в Ботническом заливе (рис. 2, в). Их целью было выяснение границ перехода «непрерывного» типа дробления льда в «прерывистое» дробление.

Основным вопросом большинства упомянутых выше исследований был вопрос определения наиболее вероятных условий возникновения прерывистого характера разрушения льда, вызывавшего наибольшие вибрации сооружения. Анализ моделей нагрузки и реакции на такие воздействия конструкций морских сооружений указывает, что при *небольшой скорости движения ледовых полей* передача их кинетической энергии сооружению происходит в виде отдельных импульсов (рис. 2, б, рис. 5, в), вызывающих отклонение сооружения от положения равновесия и накопление упругой потенциальной энергии в формирующемся в контактной зоне льда напряженном объеме. Разрушение льда при достижении в этом объеме критического напряженного состояния приводит к нарушению жесткого контакта опоры сооружения со льдом. Освободившееся от действия льда сооружение упруго, возможно с «переколебаниями», восстанавливает статическое равновесие, вытесняя обломки и раздробленный лед из зоны разрушения. До нового контакта может пройти время, определяемое скоростью ледового поля и *глубиной разрушенной прорези* во льду. При высокой скорости ледовых полей в зависимости от жесткости сооружения и прочности (жесткости) льда может произойти рост амплитуды отклонения сооружения (рис. 2, в, рис. 3), вызывая его частые колебания (вибрацию), не достигающие предельных амплитуд для сооружения. Но в случае, если частота разрушения льда, определяемая теми же параметрами, будет близкой к одной из частот собственных колебаний конструкции сооружения, в системе ЛП–МЛО могут возникать резонансные явления (рис. 3), что вполне вероятно приведет к потере устойчивости или к разрушению сооружения.

Приведенный обзор исследований колебаний сооружений в натуральных и лабораторных условиях показывает, что динамическая реакция сооружения на воздействие ледового поля зависит от различных сочетаний многих факторов: физико-механических параметров льда, размеров и гибкости основания; геометрических параметров и скорости движения ледовых образований и др. Решение задачи определения ледовой нагрузки, вызывающей периодические отклонения сооружения, можно получить, только имея *математическое описание механизма (процесса) разрушения льда*, определяющего порядок и характеры протекания физических и механических явлений в этом комплексном процессе в зависимости от различных факторов. Такое формализованное описание явления разрушения льда с учетом его феноменологических особенностей должно стать основой для *нормирования параметров циклической ледовой нагрузки*. В связи с этим на первый план выдвигаются задачи исследования *механики разрушения льда, как среды*, поглощающей часть кинетической энергии движущихся ледовых образований и создающей силовое давление на конструкции шельфовых сооружений.

### **Феноменологические особенности механизма разрушения торца ледового поля**

Уже первичный анализ факторов, обуславливающих исследуемые параметры взаимодействия основных контактирующих элементов в системе ЛП–МЛО показал, что в любой модели, предлагаемой для формализации этого явления и его описания как механического

процесса, необходимо учитывать хотя бы основные феноменологические особенности ледового поля – как источника энергии, льда – как материала разрушаемой среды, а также сооружения – как инструмента разрушения (прорезания) полубесконечной плиты, состоящей из льда. Данные проведенного обзора и собственные исследования автора позволяют сделать вывод: основными феноменологическими особенностями процесса разрушения льда на торцевой грани дрейфующего ледового поля являются следующие:

- особенности строения льда – как материала, имеющего кристаллическую структуру и сложную текстуру: размеры и ориентация кристаллов; пористость; наличие ячеек с рассолом; изменения всех этих параметров по толщине льда и т.д. (рис. 5);
- особенности, обуславливающие существенную нелинейность зависимости упругости и прочности льда от скорости его деформирования (текущая, вязкий или хрупкий механизм разрушения связей кристаллической решетки, сцепление и трение внутри кристаллов и межкристаллическое сцепление и трение в зависимости от фазового состояния солей и т.д.);
- особенности формирования полей напряжений в полубесконечной пластине ледового поля в зависимости от его толщины, поперечного размера и формы внедряющегося в его грань сооружения и скорости волны нагружающих напряжений (положение кристаллов по отношению к вектору внешней силы, плоское напряженное, плоско-деформированное или объемно-напряженное состояние в зоне, прилегающей к поверхности контакта (рис. 6).

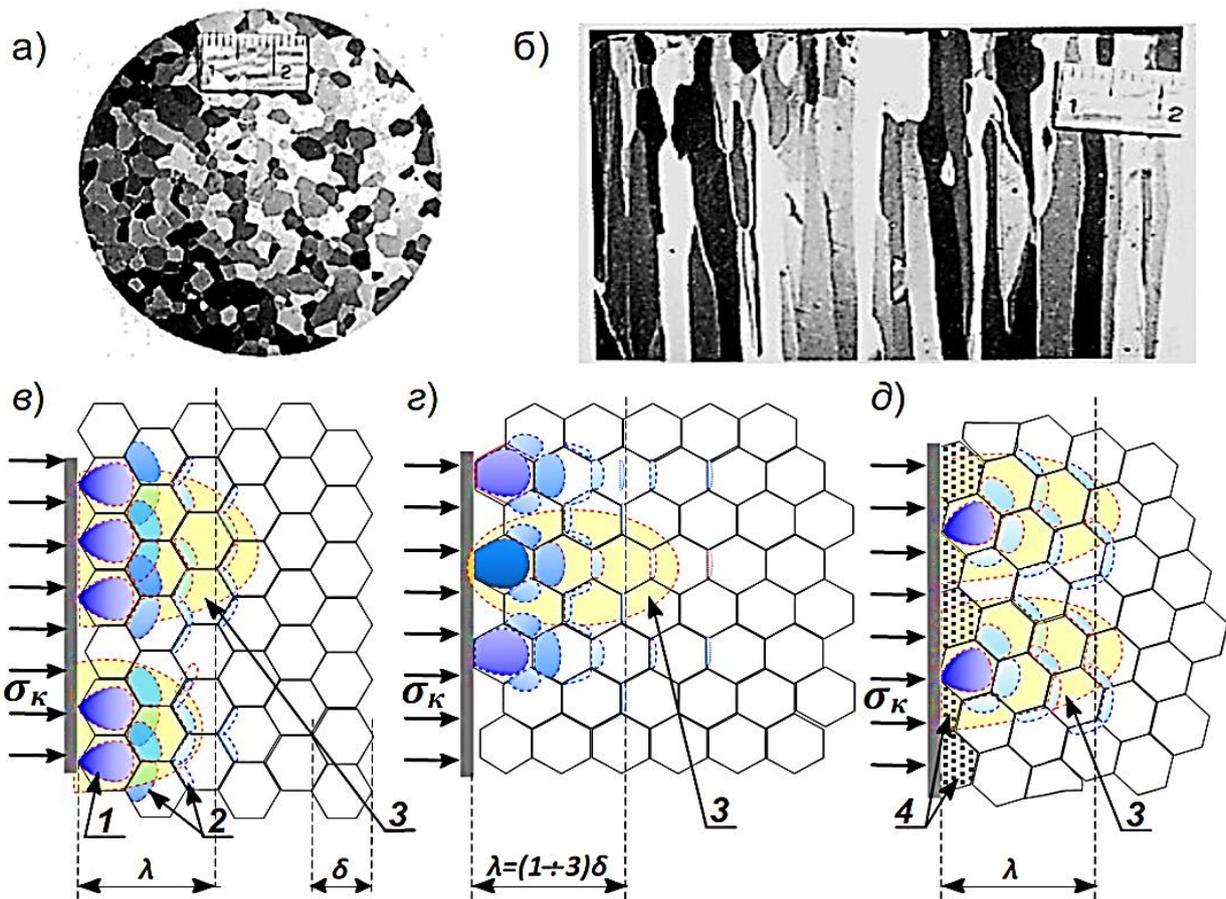
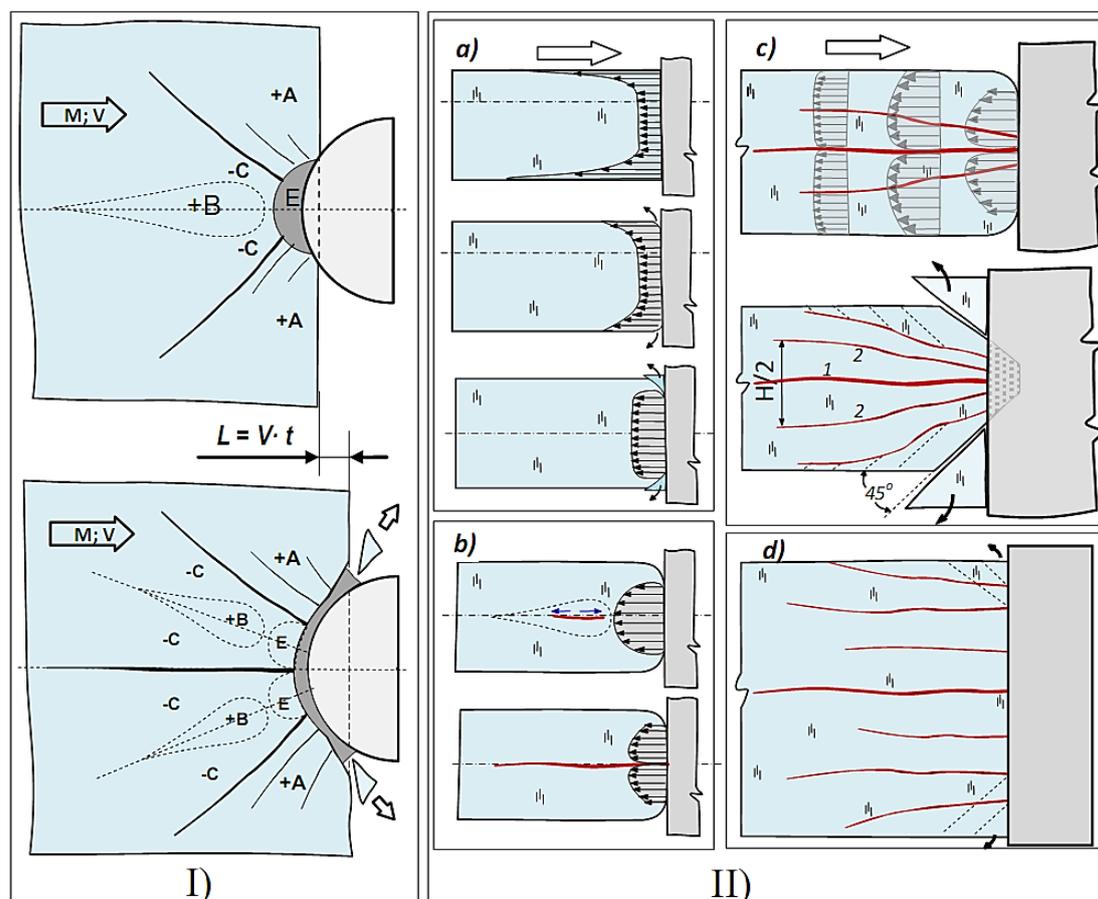


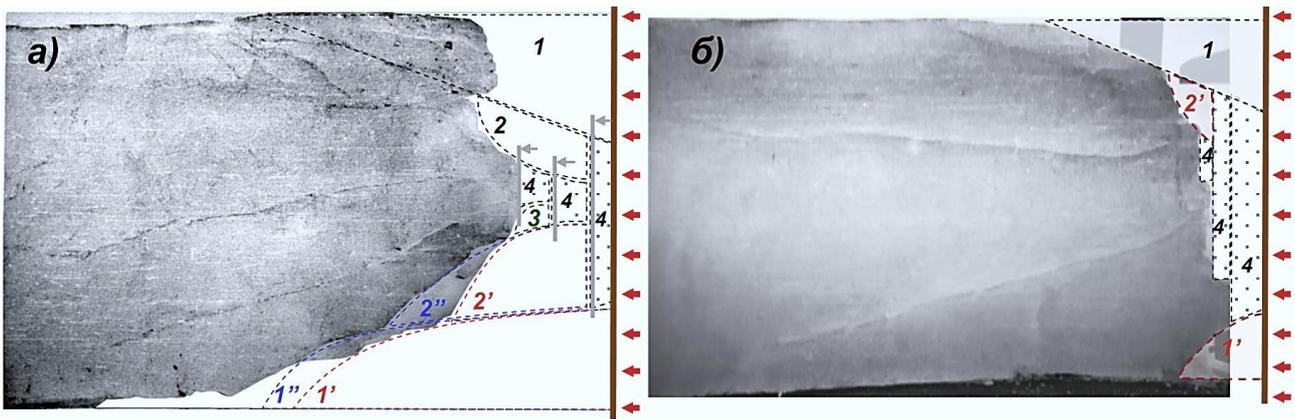
Рис. 5. Текстура (а) и ориентация кристаллов столбчатого льда (б) типа S2, по Dempsey и др. [20]; гипотеза о механизме распространения волны напряжения (передачи энергии) во льду столбчатой кристаллической структуры и послойного контактного разрушения морского льда, в случае: контакта жесткой плоскости с ребрами кристаллов (в), их гранями (г), а также при косом подходе ЛП к плоскости опоры (д); 1, 2, 3 – эпюры распределения напряжений сжатия в кристаллах льда; 4 – продукты разрушения кристаллов в предыдущих циклах процесса;  $\lambda$  – эффективная глубина распространения зоны разрушения, по: Цуприк [12].



**Рис. 6. Схемы развития напряженного состояния и процессов разрушения льда в зоне контакта при взаимодействии опоры сооружения с кромкой ледового поля – по [11, 13]:**  
**I – зоны концентрации напряжений и развития вертикальных трещин;**  
**II – динамика напряжений и развития горизонтальных трещин в плите.**

Теоретический учет лишь части перечисленных феноменологических особенностей в *математическом описании* явления контактного взаимодействия льда с сооружением, учитывая их количество и разнообразие, в рамках инженерно-проектного подхода не представляется возможным. Тем не менее каждой из указанных и не обозначенных здесь особенностей многие ученые посвятили свои исследования. Особое место в ряду таких работ занимают экспериментальные *исследования механизмов разрушения льда* при прорезании натурального ледового покрова или ледяных пластин, созданных в майнах, моделями опор. Натурный лед дает возможность избежать многих проблем моделирования физико-механических процессов его разрушения в ледовых бассейнах, а результаты опытов можно напрямую применять для анализа всех процессов этого явления. Результаты именно такого рода экспериментов дают возможность изучения исследуемого явления при комплексном учете сразу нескольких из приведенных выше феноменологических особенностей явления прорезания льда опорой сооружения.

Так, в экспериментах с натурным льдом, выполнявшихся J. Schwartz [53], F.D. Haynes и др. [28], а также K.R. Croasdale с соавторами [19, 26] в течение нескольких лет начиная с 1969 г., получены записи *многоциклового процесса разрушения кромки ледового поля* перед моделью опоры; отмечено, что помимо развития начальных *радиальных трещин* и сплошного смятия льда по всей его высоте, перед опорой образуется ограниченный *объем сильно сжатого льда в виде призмы, внутри которой лед дробится*. Кроме того, перед опорой происходит выдавливание обломков льда в виде *клинообразных объемов, сдвигаемых поверхностью опоры* в сторону нижней и верхней поверхностей ледового поля. Основные элементы картины разрушения торца ледового поля представлены на рис. 7.



**Рис. 7. Картины разрушения природного льда, при внедрении в него модели цилиндрической опоры: уменьшение «эффективной толщины»  $h'$  сколами (1, 2, 3) боковых частей ледового покрова со смятием средней части «клина» (4) при динамическом разрушении: а – «холодного» льда ( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и б – льда выдержанного 12 часов при температуре  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (По экспериментам Храпатога и Цуприка [11] на льду Амурского залива ( $V = 2,5\text{ м/с}$ )).**

Описанные явления полностью подтверждены результатами исследований: Вершинина и др. [5], Croasdale и др. [19, 26], Нурайама и др. [29], Haynes и др. [28], Saeki и др. [52], Michel и Toussaint [45], Храпатога и Цуприка [11, 13], Кры [37], Taylor [58], Sodhi [56], Karulin и др. [36], Yamashita и др. [62], Bekker [15], Habib и др. [27] и др. Аналитический обзор работ по теоретическим и экспериментальным исследованиям механизма разрушения льда выполнен в работе автора данной статьи [61].

#### **Анализ изученности проблемы и выбор целей и задач дальнейших исследований**

Решение проблемы динамического взаимодействия элементов системы ЛП–МЛО необходимо для расчетов прочности, надежности и долговечности сооружения и его элементов. Такое решение должно *дать средние и максимальные значения пиков ледовой нагрузки и частоту их появления* в зависимости от исходных параметров задачи: кинематических, кинетических и прочностных характеристик ЛП и МЛО. Особенностью явления взаимодействия ЛП–МЛО является то, что максимальное значение ледовой нагрузки, вызывающее максимальное отклонение сооружения от равновесного положения, возникает в момент разрушения льда, поэтому частота таких разрушений является частотой колебания сооружения, вызываемых дрейфующим ледовым полем. Совпадение таких колебаний с одной из собственных частот колебаний сооружения приводит к его резонансу с увеличением амплитуд, создавая сложности эксплуатации сооружения, снижая его надежность и, в конечном случае, долговечность.

В целом анализ записанных процессов взаимодействия льда на реальных эксплуатируемых сооружениях и результатов экспериментальных полунатурных и лабораторных исследований механизма разрушения льда показал следующее.

1. В зависимости от сочетания **скорости движения ледового поля, «жесткости льда» и упругой податливости опоры частота и амплитуда колебаний сооружения может изменяться в широких пределах**: от не связанных между собой отдельных пиков нарастания-спада контактной силы до квазипостоянного значения с незначительными колебаниями амплитуды со случайным и установившимся спектром частот (рис. 4, в).

2. Существуют определенные **сочетания значений указанных параметров льда и сооружения**, при которых возможно появление **автоколебаний системы ЛП–МЛО**, когда могут возникать установившиеся предельные циклы колебаний с максимальной амплитудой, наиболее опасные для сооружения (рис. 3).

3. Ледовая нагрузка является существенно нелинейной функцией, и частота колебаний пиков ледовой нагрузки зависит не только от динамических свойств сооружения и упругих свойств льда, но *значительно зависит от соотношения относительной скорости, толщины льда и диаметра опоры*, которые определяют **размеры зоны предразрушения льда** перед опорой (рис. 6–8).

Как результаты анализа обширных экспериментальных данных, эти выводы, с одной стороны, дают понятные объяснения закономерностей появления и развития цикличности ледовой нагрузки на шельфовые сооружения, с другой – говорят о необходимости дальнейших исследований и показывают главные направления развития метода расчета МЛО на циклическую нагрузку. Очевидно, что источником, обеспечивающим процессы упругого отклонения МЛО и упругого сжатия напряженного объема льда перед внедряющейся в лед поверхностью опоры, является **энергия движения ЛП**. Таким образом, важнейшим из всех направлений исследований явления *циклической нагрузки на МЛО является прежде всего механизм «отбора энергии» ЛП*, затрачиваемой на разрушение льда и *передачи этой энергии МЛО*, заставляя его конструкцию периодически отклоняться от первоначального равновесного состояния.

Следовательно, в настоящее время существует необходимость углубления понимания комплекса физических явлений, составляющих в своей совокупности процесс вибрации сооружений при их взаимодействии со льдом. Но природа цикличности разрушения льда не укладывается в каноны прочностных расчетов, основанных на силовом подходе теории упругости, поскольку в существующих методах расчета нагрузки фактор времени, а следовательно, *такие параметры, как работа и мощность разрушения льда*, не учитываются. Некоторые исследователи уже в 1980-х годах обращали внимание на возможность описания процесса взаимодействия сооружения со льдом в параметрах удельных затрат энергии на разрушение льда в зоне контакта ледового поля с конструкцией морских оснований [10, 32, 55]. Они предлагали использовать для этого величину *«удельной энергии разрушения льда»*, связанную корреляционной зависимостью с контактным давлением льда, но более универсально описывающую природу всего комплекса процессов, происходящих при формировании объема предразрушения и процессов трещинообразования во льду непосредственно. Из механики разрушения следует, что энергетический критерий есть необходимое условие распространения трещины, и этот критерий обязательно должен быть достаточным. Данный параметр в те годы уже был численно изучен в экспериментальных исследованиях [64, 66], более того, разработана и апробирована модель расчета контактных сил и глубины внедрения в ледяной покров жесткой сферы. Но применять этот параметр в *расчетах циклической нагрузки на опоры* не предлагалось. Поэтому в данной работе предлагается продолжить исследования возможности использования энергетического критерия разрушения морского льда, критическое значение которого достигается за определенный интервал времени в результате накопления потенциальной энергии упругого сжатия локального объема льда в месте его контакта с сооружением.

Таким образом, на основе результатов анализа теоретических и экспериментальных работ нам представляется возможной разработка *математической модели взаимодействия ледового поля с опорой сооружения*, описывающей процесс формирования циклической ледовой нагрузки на сооружение с учетом феноменологических особенностей разрушения морского льда. В основе данной модели должен быть процесс функционирования материальной системы «ЛП–МЛО» – как *процесс передачи энергии движущегося ледового поля ограниченному объему льда* в зоне контакта, упруго накапливающей энергию до ее критического уровня в этом объеме и вызывающую его *циклическое разрушение* с определенной периодичностью. Наиболее существенным свойством такой модели будет механизм преобразования кинетической энергии ледового поля в работу, затрачиваемую на упругое отклонение сооружения, равную энергии, расходуемой на упругое сжатие локаль-

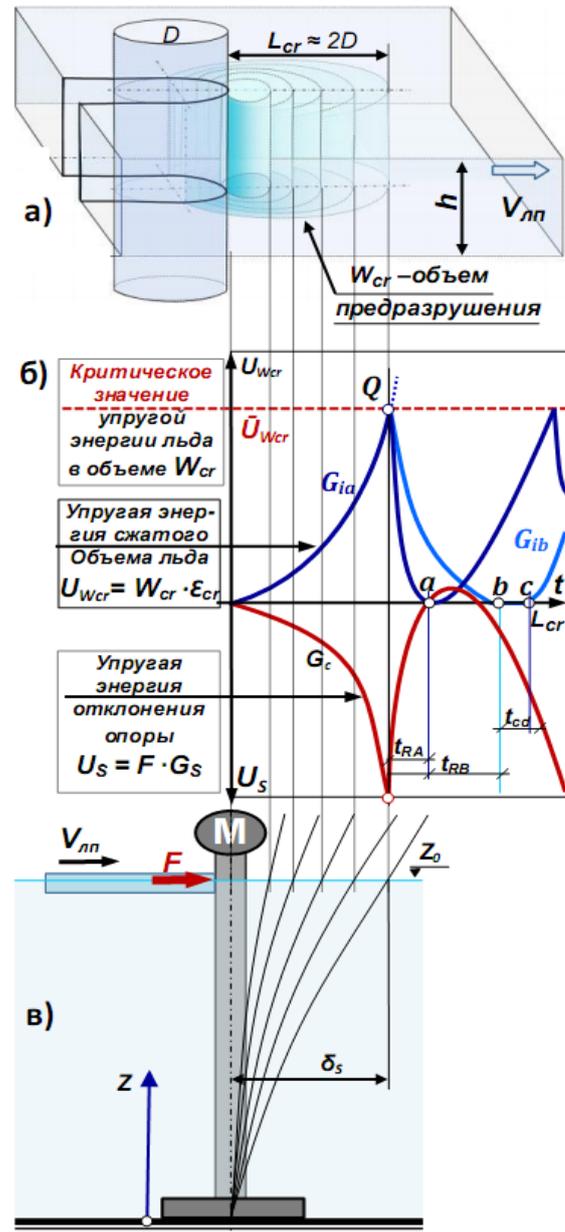
ного объема льда в зоне взаимодействия двух основных элементов системы ЛП–МЛО до его критического состояния, результатом которого является разрушение льда.

Энергетический подход может быть использован в качестве теоретической модели, связывающей накопление повреждаемости и разрушение льда с изменением его состояния в энергетическом фазовом пространстве. Такая модель должна описывать накопление упругой потенциальной энергии в единице объема льда (рис. 8, а) и, по аналогии с теорией Гриффитса для плоской трещины, количественно характеризовать *накопленный упругий потенциал поверхностной энергии* во всех дефектах структуры *и энергии межзатомных связей в кристаллах льда* в его напряженном объеме в контактной зоне торца ледового поля с поверхностью опоры сооружения.

**Превышение удельной энергии** в одном из единичных объемов льда (рис. 8, б), согласно такой гипотезе, будет вызывать начало спонтанного разрушения всего преднапряженного объема системой разнонаправленных трещин различной природы (рис. 6, 7); разгрузку массива льда за пределами его разрушенного объема в контактной зоне; резкое падение контактной силы давления льда на опору сооружения; начало восстановления положения ее равновесия за счет сил упругости конструкции; вытеснение продуктов разрушения льда из зоны контакта движущейся в обратном направлении поверхностью опоры (рис. 8, б, в).

### Заключение

Особенностью явления взаимодействия ЛП–МЛО является циклическое разрушение льда на поверхности опоры сооружения, периодичность которого связана с механизмом накопления упругой энергии в напряженном массиве льда и одновременным упругим отклонением сооружения от равновесного положения. Максимальное значение ледовой нагрузки, вызывающее максимальное отклонение сооружения от равновесного положения, возникает в момент разрушения льда, поэтому частота таких разрушений является частотой колебания сооружения, вызываемых дрейфующим ледовым полем. Возможность резонанса сооружения с частотой разрушения льда приводит к увеличению отклонений сооружения, создавая сложности эксплуатации сооружения, снижая его надежность и, в конечном итоге, долговечность. Предлагаемые современными исследователями методы использования в расчетах циклической нагрузки в качестве критерия прочно-



**Рис. 8. Основные параметры предлагаемой модели циклического разрушения льда в процессе взаимодействия ледового поля с подвижной опорой сооружения:**  $L_{cr}$  – длина зоны разрушения льда за один цикл;  $W_{cr}$  – разрушаемый объем льда;  $U_{Wcr}$  – упругая энергия сжатого объема льда;  $\epsilon_{cr}$  – удельная энергия механического разрушения льда;  $G_s$  – жесткость опоры (основания);  $\delta_s$  – амплитуда отклонения сооружения.

сти кубиковую прочность льда не укладываются в каноны прочностных расчетов, *основанные на силовом подходе теории упругости*, поскольку в существующих методах расчета нагрузки отсутствует фактор времени, следовательно, не учитываются *такие параметры, как работа и мощность разрушения льда*. В качестве теоретической модели, связывающей накопление повреждаемости и разрушение льда с изменением его состояния в энергетическом фазовом пространстве предлагается использовать энергетический подход. Использование *удельной энергии механического разрушения льда  $\epsilon_{cr}$*  в расчетах морских ледостойких оснований на ледовую циклическую нагрузку в качестве критерия прочности представляется более обоснованным и целесообразным, учитывая известные знания о возможностях описания механических явлений с использованием физической величины энергии:

- энергия подчиняется фундаментальному закону сохранения при любых превращениях, справедливому как для отдельных частиц, так и для системы в целом. При этом для каждого процесса, в т.ч. и разрушения, справедливы уравнения энергетического баланса;

- энергия системы является однозначным параметром ее состояния. Любые изменения, происходящие с материалом в процессе деформации, взаимодействия со средой и т.д., можно представить как перемещение фазовых точек системы в одномерном энергетическом фазовом пространстве;

- энергия имеет четкий физический смысл и лучше всего соответствует сущности понятий о прочности как о потенциальных энергетических барьерах, препятствующих протеканию в системе кинетических (необратимых) процессов.

Установлено, что энергия, как характеристика внутреннего состояния твердого тела, отвечает всем требованиям, предъявляемым к критерию прочности льда: полноты, непротиворечивости, инвариантности, воспроизводимости, предсказуемости и математического описания [60]. В области механики разрушения льда накоплен достаточный опыт для развития методов экспериментального определения удельной энергии его механического разрушения  $\epsilon_{cr}$ , который показывает, что эту величину можно использовать в качестве критерия разрушения льда в расчетах параметров циклической ледовой нагрузки на сооружение.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ажермачев Г.А. О воздействии льда на опоры морских платформ при его подвижке // Строительство и техногенная безопасность. 2005. № 12. С. 6–9.
2. Афанасьев В.П., Долгополов Ю.В., Швайштейн З.К. Давление льда на морские отдельно стоящие опоры // Тр. ААНИИ. Л., 1971. Т. 300. С. 61–80.
3. Белендир Е.Н. Научное обоснование проектирования гравитационных опорных блоков морских ледостойких платформ и их сопряжения с грунтовым основанием: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: ВНИИГ, 2006. 45 с.
4. Вершинин С.А., Копайгородский Е.М., Панов В.В., Швайштейн З.И. Давление льда на отдельно стоящие опоры по лабораторным и натурным испытаниям // Тр. ААНИИ. Л.: Гидрометиздат, 1975. Т. 326 (Физические методы исследования льда и снега). С. 59–65.
5. Вершинин С.А., Трусков П.А., Кузьмечев К.В. Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа. М.: Институт Гипростроймост, 2006. 208 с.
6. Кореньков В.А. Натурные измерения динамического давления льда на бычок низконапорной плотины // Тр. координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 111. Л.: Энергия, 1976. С. 148–152.
7. Литонов О.Е. К вопросу анализа динамических моделей воздействия льда на морские платформы // Российский морской регистр судоходства. Вып. 34. СПб., 2011. С. 237–241.
8. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Свод правил, актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82\*.2013.
9. Хейсин Д.Е., Лихоманов В.А., Курдюмов В.А. Определение удельной энергии разрушения и контактных давлений при ударе твердого тела о лед // Тр. ААНИИ. М.: Гидрометеоздат, 1975. Т. 326. С. 210–218.

10. Храпатый Н.Г., Цуприк В.Г. К вопросу расчета бесконечных плит на упругом основании на удар с учетом контактных явлений // Гидротехника и гидравлика. Владивосток: ДВПИ, 1978. С. 41–54.
11. Храпатый Н.Г., Цуприк В.Г. Полунаатурные исследования динамического воздействия льда на опоры гидротехнических сооружений // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике (Ледотермические явления и их учет при возведении и эксплуатации гидроузлов и гидротехнических сооружений). Л.: Энергия, 1979. С. 101–104.
12. Цуприк В.Г. Методология определения ледовой нагрузки на ледостойкие основания с использованием удельной энергии разрушения льда // Полярная механика: материалы междунар. науч. конф. Владивосток: Дальневост. федеральн. ун-т, 2016. С. 306–320.
13. Цуприк В.Г. Об учете характера контактных разрушений льда при нормировании нагрузки на вертикальные опоры шельфовых сооружений // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике (Борьба с ледовыми затруднениями на реках и водохранилищах при строительстве и эксплуатации ГТС). Л.: Энергия, 1984. С. 176–180.
14. Barker A., Timco G., Gravesend H., Vølund P. Ice loading on Danish wind turbines. Part 1: Dynamic model tests. *Cold Regions Science and Technology*, 2005;41:1–23.
15. Bekker A.T. The Ice Load Formation Modeling in the Interaction of Ice Plate with a Cylindrical Indenter. *Proc. of the Twenty-fifth Int. Ocean and Polar Eng. Conf., Kona, Hawaii, USA, 2015*, pp. 1723-1729.
16. Bergdahl L. Two lighthouses damaged by ice. *Symposium on Ice and Its Action on Hydraulic Structures, IAHR. Leningrad, 1972*, pp. 234-238.
17. Bjerkaas M., Skiple A. Occurrence of continuous and intermediate crushing during ice-structure interaction. *Proceedings, Eighteenth International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC05, St. John's. 2005*, pp. 1-10.
18. Blenkarn K.A. Measurement and analysis of ice forces on Cook Inlet structures. *Proceedings, 2<sup>nd</sup> Offshore Technology Conference, Houston, TX, OTC 1261, 1970; II*, pp. 365-378.
19. Croasdale K.R., Morgenstern N.R., Nuttall J.B. Indentation tests to investigate ice pressures on vertical piers. *Journal Glaciology. 1977;81:301-312*.
20. Dempsey J.P., Wei Y., De Franco S.J. Notch sensitivity and brittleness in fracture testing of S2 columnar freshwater ice. *International Journal of Fracture. 1992;53:101–120*.
21. Du X., Huang Y. A Model Test Study of Ice-Induced Vibration in Four-Legged Jacket Platforms with Conical Structure in Bohai Bay. *Proc. of the Twenty-sixth Int Offshore and Polar. Eng. Conf., Rhodes, Greece, 2016*, pp. 1317-1323.
22. Engelbrektson A. An ice-structure interaction model based on observations in the Gulf of Bothnia. *POAC'89, 1989;1:504-517*.
23. Engelbrektson A. Dynamic ice loads on lighthouse structures. *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions. St. John's, Canada, 1977;2:654–864*.
24. Eranti E. Ice Forces in Dynamic Ice Structure Interaction. *International Journal of Offshore and Polar Engineering. 1992;2(3):12-20*.
25. Frederking R., Timco G.W. Sea Ice Floe Impact - Large Scale Basin Experiment. *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Seattle, ISOPE, 2000;1:640-645*.
26. Groasdale K.E. The Nutcracker ice strength Tester and its operation in the Beaufort sea. *IAHR. Symp. Ice and its Action on Hydraulic structures. Reykjavik, Iceland, 1970*, pp. 4-6.
27. Habib K.B., Taylor R.S., Bruneau S., Jordaan I. Experimental study of dynamics during crushing of freshwater truncated conical ice specimens. *Proceedings of Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, OMAE2015, San Francisco, USA. 2015*, pp. 1-10.
28. Haynes F.D., Nevel D.E., Farrell D.R. Ice forces measurements on the Pembina river, Alberta, Canada. *US CRREL TR 269. Hanover, NH., USA. 12 p*.
29. Hirayama K., Schwarz J., Wu H.C. Ice forces of vertical pile indentation and penetration. *Proc. IAHR Ice Symp. Hanover. 1975*, pp. 442-445.
30. Huang Y., Shi Q., Song S. The interaction between ice and a compliant vertical pile. *Proceedings of the 19<sup>th</sup> Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Dalian, China. 2007;1:142–152*.
31. ISO/FDIS 19906 (2010). Petroleum natural gas industries - Arctic offshore structures, ISO TC 67/SC 7N. International Organization for Standardization (Draft), 2011.
32. Iyer S.H. Existing ice codes and suggested criteria. *Proc. IAHR Ice Symposium, Ice forces on structures. Lulea, Sweden, 1978*, pp. 363-378.

33. Jefferies M.G., Wright W.H. Dynamic Response of Molikpaq to Ice-Structure Interactions. Proceedings 7<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Houston, TX, USA. 1988;IV:201-220.
34. Kärnä T., Kolari K., Jochmann P., Evers K-U., Xiangjun B., Määttänen M., Martonen P. Tests On Dynamic Ice-Structure Interaction. Proc. of OMAE'03 22<sup>nd</sup> Int. Conf. on Offshore Mech. and Arctic Eng. Mexico. 2003, pp.1-7.
35. Kärnä T., Qu Y., Kuhnlein W., Yue Q., Bi X. A spectral model of ice forces due to ice crushing. J. Offshore Mech. Arct. Eng. 2007(129):138–145.
36. Karulin E., Marchenko A., Karulina M. et al. Field Indentation Tests of Vertical Semi-Cylinder on First-Year Ice. Proc. 22<sup>nd</sup> Int. Symp. on Ice (IAHR), Singapore. 2014, pp. 179-186.
37. Kry P.R. Ice forces on wide structures. Canadian Geotech. J. 1980;17:97-13.
38. Kujala P. Modelling of the ice edge failure process with curved failure surfaces. Int. Symp. on Applied Snow and Ice research, Rovaniemi, Finland, 1993, pp. 1-16.
39. Liu L.M. Sea ice engineering in the Bohai Sea. Proc. of 1<sup>3th</sup> IAHR ice Symposium. Beijing, China. 1996;3:906-912.
40. Liu X., Li G., Oberlies R., Yue Q. Research on short-term dynamic ice cases for dynamic analysis of ice-resistant jacket platform in the Bohai Gulf. Marine Structures, 2009(22);3:457-479.
41. Määttänen M. Stability of self-excited ice-induced vibrations. Proc. POAC-77, 4th Int. Conf. Port and Ocean Eng. Arctic Cond. Newfoundland, Canada, 1977/2, pp. 684-694.
42. Määttänen M. Experiences of ice forces against a steel lighthouse mounted on the seabed and proposed constructional refinements. Proceedings of the 3rd Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Fairbanks, AK, USA, 1975;2, pp. 857–869.
43. Määttänen M. Ice-force measurements at the Gulf of Bothniaby the Instrumented Ketil lighthouse. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Port and Ocean Eng. Arctic Cond. Newfoundland, POAC-77. Eng. Arctic Cond. Newfoundland, 1978;2, pp. 730-740.
44. Määttänen M., Løset S., Metrikine A., Evers K.-U., Hendrikse H., Lønøy C., Metrikin I., Nord T., Sukhorukov S. Novel Ice Induced Vibration Testing in a Large-scale Facility: Deciphering Ice Induced Vibrations, Part 1. 21<sup>st</sup> IAHR International Symposium: Ice Research for a Sustainable Environment. Dalian. 2012, pp. 946-958.
45. Michel B., Toussaint N. Mechanics and theory of indentation of ice plates. Journal of Glaciology. 1977(19);8:285-300.
46. Muhonen A., Kärnä T., Eranti E., Riska K., Jarvinen E., Lehmus E. Laboratory indentation tests with thick freshwater ice. VTT Research Notes 1370. Espoo, Finland, 1992, 92 p.
47. Neill G.R. Dynamic ice forces on piers and piles: an assessment of design guidelines in the light of recent research. Canadian J. of Civil Engineering. 1970;3:305-341.
48. Nord T.S., Øiseth O., Lourens E.-M. Ice force identification on the Nordströmsgrund lighthouse. Computers and Structures, 2016(169):24-39.
49. Nord T., Määttänen M. Modal analysis in ice-structure interaction: Deciphering ice induced vibrations, Part 2. Proceedings of the 21st. IAHR Symposium on Ice. Dalian, China. 2012, pp. 24-39.
50. Onken G., Evers K., Haase A., Jochmann P. Ice model tests with a cylindrical structure to investigate dynamic ice structure interaction. Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Espoo. 2013. 9 p.
51. Peyton H.R. Sea ice forces. Ice pressures against structures. Technical Memorandum, 92. National Research Council of Canada. Ottawa, Canada. 1966, pp. 117-123.
52. Saeki H., Hamanaka K., Ozaki A. Experimental on ice forces on pile. Proceedings International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Vol. 2. 1977, pp. 195-706.
53. Schwartz J. The Pressure of the Floating Ice Fields on Piles. Proceedings of the International Symposium on Ice (IAHR). Reykjavik, Iceland. 1970;6(3), 12 p.
54. Sodhi D.S. Nonsimultaneous crushing during edge indentation of freshwater ice sheets. Cold Regions Science and Technology. 1998(27):179-195.
55. Sodhi D.S., Morris, C.E. Dependence of crushing specific energy of urea ice on the aspect ratio and the structure velocity. Proceedings, 16<sup>th</sup> Annual Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, OTC 4688. 1984, pp. 363-374.
56. Sodhi D.S. Crushing failure during ice-structure interaction. Engineering Fracture Mechanics. 2001(68):1889-1921.

57. Takeuchi T., Akagawa C., Nakazawa N., Sakai M., Terashima T., Saeki H. Ice Failure Mode and Ice Load Observed in Medium-Scale Field Ice Indentation Test. Proc. of the Twelfth International Off-shore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu, Japan. 2002, pp. 607-612.
58. Taylor T.P. An experimental investigation of the crushing strength of ice. Proceedings International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Quebec. 1981, pp. 332-345.
59. Timco G.W., Johnston M.E., Wright B.D. Multi-Year Ice Loads on the Molikpaq: May 12, Event. Proceedings 18th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'05. Potsdam, NY, USA. 2005;1, pp. 453-462.
60. Tsuprik V.G. Determination the effective part of energy Indenter's that spent on destruction of ice, Proc. of the 23<sup>rd</sup> International. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'15. Trondheim, Norway, 2015, 12 p.
61. Tsuprik V.G. The Fracture Laws of Ice Edge in its Interaction with the Shaft Surface of the Structure. Proc. of the Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference. Kona, Hawaii Big Island, USA. 2015, pp. 1803-1808.
62. Yamashita M., Katayama M., Taguchi Y., Nawata T., Kawasaki T., Kayo Y., Tozawa S. Model test and analytical simulation of fracture mechanism ice. Proc. POAC, 1985, pp. 195-204.
63. Yue Q., Bi X. Ice-induced jacket structure vibrations in Bohai Sea. Journal of Cold Regions Engineering, 2000;14(2):81-92.
64. Yue Q.J., Bi X.J., Li F., Qu Y. Full-scale tests of dynamic ice force in Bohai Bay. Proc.of 17<sup>th</sup> IAHR International Symposium on Ice, 2004;2, pp. 139-146.
65. Yue Q., Guo F. Physical mechanism of ice-induced self-excited vibration. J. Eng. Mech. 2011(138):784-790.
66. Yue Q., Guo F., Kärnä T. Dynamic ice forces of slender vertical structures due to ice crushing. Cold Regions Science and Technology. 2009(56):77-83.
67. Zhang D.Y., Wang G.J., Yue Q.J., Lou C.J. Structural Ice-resistant Performance Evaluation of Off-shore Wind Turbine Foundation. Proceedings of the Twenty-sixth International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece. 2016, pp. 83-90.

[THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE](#)

**Hydrotechnical Construction**

DOI.org/10.5281/zenodo.896998

Tsuprik V.

VLADIMIR TSUPRIK, Candidate of Engineering Sciences, Professor, Head of Department of Building Materials and Structures, Deputy Director, School of Engineering, e-mail: vg\_tsuprik@mail.ru  
*Far Eastern Federal University*. 8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

### **The mechanism of generating cyclic ice pressure on offshore structures caused by ice destruction (review)**

**Abstract:** The non-stationary process of ice destruction when the drifting ice field (IF) contacts with the ice resistant sea platform (IRP) can cause dangerous vibrations and, potentially, dangerous dynamic pressure on that offshore structure. The extreme resonant oscillations of the platform base can entail not only disruptions to the regular operation of the platform but also a significant reduction of the reliability of the structure and its durability with the ensuing fatigue fracture or its equipment. The process can also affect the bearing capacity of the soil under the base of the platform. The dynamic ice destruction is a complex process and the development of the models of this phenomenon requires a complex investigation and solution. The dynamic reaction of the structure on the effect of the ice field depends on many factors: the size and flexibility of the leg of the platform; the speed of the ice pressure, the temperature and physico-mechanical parameters of the ice, etc. The object of this research is the functioning process of the real system *IF-IRP*, the process of the energy of the moving ice field transferring to the limited volume of the ice in the area of contact, accumulating the received elastic energy to its critical level in that volume and causing its destruction with a certain frequency. The subject of the research is the mechanism of ice fracture in the zone of interaction of the two basic elements of the system: the ice field and IRP. The study is to determine and describe the regularities of the formation of the cyclic ice pressure on the structure taking into account the phenomenological features of sea ice fracture, which is a mechanism for converting the kinetic energy of the ice field into the energy of elastic deviations of the leg of the platform and the energy spent on the destruction of the ice.

**Key words:** offshore structures, sea ice, cyclic pressure, vibration, ice fracture, specific energy fracture of ice.

**REFERENCES**

1. Ajermachev G.A. On the effect of ice on the supports of offshore platforms when it moves // Building and technogenic security. 2005;12:6-9.
2. Afanasyev VP, Dolgoplov Yu.V., Shvayshtein Z.K. Ice pressure on marine stand-alone supports. Tr. AARI. L., 1971. P. 300. P. 61-80.
3. Belendir E.N. Scientific substantiation of the design of gravity support blocks of marine ice-resistant platforms and their interface with the ground base: the author's abstract. dis. ... Dr. techn. sciences. SPb.: VNIIG, 2006. 45 p.
4. Vershinin SA, Kopaygorodsky EM, Panov VV, Shvayshtein ZI Pressure of ice on separately standing supports for laboratory and full-scale tests, Tr. AARI. L., Gidrometizdat, 1975. Vol. 326 (Physical Methods of Investigating Ice and Snow), p. 59-65.
5. Vershinin SA, Truskov PA, Kuzmechev K.V. The impact of ice on the structures of the Sakhalin shelf. Moscow, Giprostroy Institute, 2006, 208 p.
6. Korenkov V.A. Full-scale measurements of the dynamic pressure of ice on the goby of a low-pressure dam // Tr. coordination meetings on hydraulic engineering. N 111. L., Energiya, 1976, p. 148-152.
7. Litonov O.E. On the analysis of dynamic models of the effect of ice on offshore platforms. Russian Maritime Register of Shipping. N 34. St. Petersburg, 2011, p. 237-241.
8. SP 38.13330.2012. Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and ships). Code of Regulations, updated version of SNIIP 2.06.04-82 \* .2013.
9. Kheysin DE, Likhomanov VA, Kurdyumov VA Determination of the specific energy of fracture and contact pressures when a solid strikes the ice. Tr. AARI. M., Gidrometeoizdat, 1975. p. 210-218.

THE FULL LIST of REFERENCES: SEE THE RUSSIAN PART of the ARTICLE