

УДК 539.3; 629.12

Р.В. Гольдштейн, Н.М. Осипенко

Вопросы механики разрушения льда и ледяного покрова при анализе ледовых нагрузок

Ключевые слова:
разрушение,
трещина,
ледяной покров,
ледовые нагрузки,
контакт.

Keywords:
disintegration,
crack,
floe-ice,
ice loads,
junction (contact).

Крупномасштабные ледяные образования в акватории морей представляют значительную опасность для работы таких морских сооружений, как платформы для разведки и добычи углеводородного сырья. Интерес к их механике и прочности связан и с другими аспектами. Известны примеры использования ледовых причалов, дорог, аэродромов. Например, айсберги ледникового происхождения могут служить источниками пресной воды и т.д. Необходимость механического воздействия на них также связана с различными техническими приложениями. С точки зрения механики разрушения льда и ледяного покрова большой интерес представляют проблемы крупномасштабного механического взаимодействия ледовых массивов с инженерными сооружениями, которое в значительной степени определяет условия ледовой безопасности конструкций на шельфе арктических морей.

Существующие стандарты предусматривают необходимость учета механического воздействия крупномасштабных ледяных образований на морские сооружения [1, 2], однако в расчетных методиках не принимаются во внимание сценарии событий, связанные с развитием процессов разрушения льда и их последствиями. Вместе с тем, по ряду параметров взаимодействия такого рода уникальны. В частности, масса плавающих ледяных образований достигает 10^6 т и более, площадь непосредственного локального контакта, сопровождающегося разрушением льда и элементов сооружения, может составлять десятки квадратных метров, скорость сближения льда и неподвижной конструкции также значительна – около 0,1 м/с. В такой ситуации получение эмпирических данных о закономерностях процесса разрушения, определяющего характер и изменчивость ледовых нагрузок в соответствующем масштабе, становится чрезвычайно трудоемким и дорогостоящим.

Большое значение приобретают разработка и параметрический анализ механико-математических моделей процессов. Важен и поиск способов физического моделирования взаимодействия крупномасштабных ледяных образований и инженерных объектов на малых моделях с учетом масштабной изменчивости локальных механизмов разрушения и энергообмена. Некоторые подходы к этой проблеме рассмотрены в [3, 4]. Ниже представлен ряд моделей процесса разрушения крупномасштабных ледяных массивов.

Взаимодействие ледяных массивов с морскими конструкциями

Коротко остановимся на описании качественной картины явления. Массивные ледяные образования часто встречаются в полярных морях. Например, районы их образования, форма и размеры для Баренцева и Карского морей обсуждены в [5]. Появление крупных ледяных образований замечено в районе месторождений на шельфе Баренцева моря. Так, в 2003 г., по данным ААНИИ [6], в этом районе было зарегистрировано 109 айсбергов и их обломков массой от 50 тыс. до 3,7 млн т. Айсберги в основном движутся со скоростями, определяемыми течениями. Максимальные скорости движения около 0,1 м/с.

Характер разрушения ледяного образования у преграды связан с его геометрией, геометрией преграды (протяженностью и наклоном поверхности контакта) и скоростью взаимодействия. К настоящему времени разработаны методика анализа условий безопасности работы ледостойких конструкций по отношению к относительно плоским элементам ледяного покрова, не имеющим соизмеримых пространствен-

ных размеров, а также варианты соответствующих конструкций [7]. Ряд расчетных случаев взаимодействия отражен в нормативных документах [1]. Модель механизма контактного разрушения льда при большой площади силового контакта предложена авторами ранее [8, 9]. Вместе с тем сценарии и последствия силового контакта с крупномасштабными ледяными образованиями изучены недостаточно.

Меры борьбы с опасностью столкновения ледяного массива с конструкцией в значительной степени связаны с соотношением их масс и прочностей. Так, очевидно, что в случае опасности со стороны наиболее крупных массивных образований необходимы меры активного воздействия – изменение траектории движения и т.п., в то время как менее крупные образования могут быть переведены в безопасное состояние и пассивными методами защиты.

К последним можно отнести возможность раскалывания относительно малых блоков льда. Отметим также эффект гашения энергии удара не только за счет включения демфирующих элементов конструкции сооружения, но и путем перевода кинетической энергии массы ледяного образования в энергию дробления льда или специального защитного слоя, размещенного на ледовом поясе сооружения.

Приведем иллюстративную оценку последнего варианта. Наибольшее энергопоглощение отмечается при мелкодисперсном измельчении материала, которое характерно, в частности, для процесса локального разрушения льда при стесненном сжатии на контакте с жесткой преградой. Воспользуемся экспериментальными данными о стесненном разрушении льда [10]. При среднем давлении в среде продуктов разрушения на фронте контакта 10–15 МПа взаимное смещение контактирующих объектов составило 0,2–0,3 м. Это дает возможность оценить совокупную удельную энергию дробления льда и вытеснения мелкодисперсных продуктов разрушения из области контакта: порядка 2–5 МДж/м³. Для сравнения укажем, что кинетическая энергия айсберга массой 1 млн т (без учета присоединенной массы) при скорости 0,1 м/с составляет значение порядка 5 МДж. Таким образом, для торможения такого айсберга достаточно измельчить 1 м³ его массы. Для анализа безопасности на основе механики разрушения необходимо развитие моделей разрушения массива льда или его элементов в различных масштабах взаимодействия.

Ниже представлены некоторые из таких моделей в квазистатической постановке.

Определение предельного уровня разрушающей нагрузки

Объем льда, составляющий монолитный ледяной массив, имеет сложные очертания, поэтому в обобщенном анализе условий его механического разрушения удобно использовать асимптотические оценки, основанные на принципах механики разрушения. Покажем это на примере развития магистральной трещины, разрушающей айсберг.

Рассмотрим плоскую модель процесса. Ранее подобная модель использовалась для анализа условий разрушения ледоколом отдельного ледяного поля [11]. Если плоское сечение айсберга можно представить как некоторую выпуклую фигуру (рис. 1), а создаваемые внешней нагрузкой взаимодействия с преградой – как силы, сконцентрированные в малой по сравнению с размером айсберга области приложения, в отношении условий его разрушения можно для оценок использовать ряд упрощений. В частности, локальные внешние нагрузки можно свести к сосредоточенным силам, приложенным к берегам растущей трещины. В этом случае на начальном этапе развития разрыва, когда размер трещины много меньше характерного поперечного размера айсберга, условия ее предельного равновесия близки к таковым для расклиниваемой сосредоточенными силами трещины, выходящей на границу полуплоскости (рис. 1б). К моменту приближения трещины к свободной границе вступает другая асимптотика, когда становится важным только расстояние до этой границы (рис. 1г). В промежуточном состоянии ситуация напоминает условия предельного равновесия компактного образца, разрываемого сосредоточенными силами [12], для которого имеет значение соотношение продольного и поперечного размеров (рис. 1в). Одним из важных свойств такого сценария разрушения является немонотонность коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в вершине растущего разрыва по мере его продвижения от области инициирования к внешней границе. При малых размерах он уменьшается, достигая минимума, а затем возрастает. В соответствии с этим трещина на начальном этапе развивается устойчиво, т.е. для увеличения ее размера каждый раз нужно увеличивать нагрузку.

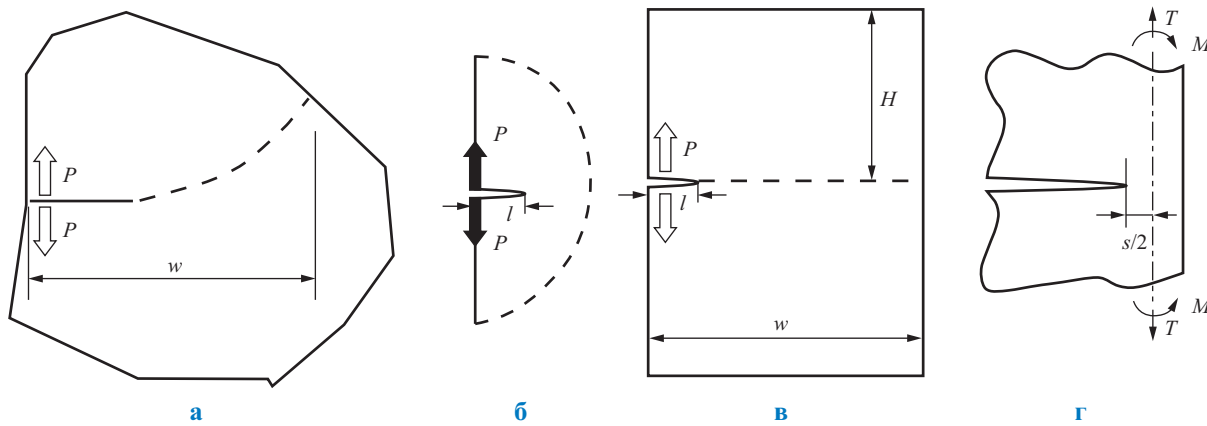


Рис. 1. Плоская модельная задача о разрушении (разделении) айсберга

При достижении размера, определяемого соотношением габаритных размеров айсберга, этот режим сменяется неустойчивым, в результате чего при сохранении силового воздействия происходит разделение айсберга. Максимальное усилие раскалывания, таким образом, достигается при минимальном значении коэффициента интенсивности напряжений при фиксированном отношении длины трещины и расстояния до внешней границы айсберга. Оценим эти условия для упомянутого плоского варианта, используя аппроксимации численных решений соответствующих задач механики разрушения [12]. Для задачи о трещине, выходящей на границу полуплоскости (рис. 1б), имеем

$$K_I \approx 0,825P\sqrt{\frac{\pi}{l}}, \quad (1)$$

где l – длина растущего разрыва; P – погонная сосредоточенная сила.

В случае второй асимптотики, когда расстояние до внешней границы мало (рис. 1г),

$$K_I \approx \sqrt{\pi} \left(\frac{4\pi - 12}{\pi^2 - 8} \frac{T}{\sqrt{s}} + \frac{4\pi - 12}{\pi^2 - 8} \frac{M}{s\sqrt{s}} \right), \quad (2)$$

где s – расстояние от вершины трещины до границы полуплоскости; T – сила, приложенная симметрично относительно линии разрыва на его продолжении ($T \sim P$); M – изгибающий момент ($M = D(w + l)/2$).

Переходя к интересующему нас варианту условий нагружения, запишем из (2)

$$K_I \approx \frac{\sqrt{\pi}P}{\sqrt{w}} \left(0,3\sqrt{1 - \frac{l}{w}} + 1,23 \frac{1 + l/w}{(1 - l/w)^{3/2}} \right), \quad (3)$$

где w – ширина пластины.

Для варианта с ограниченными размерами модельной пластины используем интерполяцию, предложенную Ньюменом и Вилсоном [12] в ситуации, когда поперечный размер пластины $2H$ превышает продольный w . Это дает оценку снизу:

$$K_I \approx \frac{P}{\sqrt{w}} \frac{(2 + l/w)}{(1 - l/w)^{3/2}} \left(0,807 + 8,858 \frac{l}{w} - 30,23 \left(\frac{l}{w} \right)^2 + 41,088 \left(\frac{l}{w} \right)^3 - 24,15 \left(\frac{l}{w} \right)^4 + 4,95 \left(\frac{l}{w} \right)^5 \right). \quad (4)$$

Заметим, что (4) в диапазоне $l/w \geq 0,16$ с точностью до 5 % можно заменить простым соотношением

$$K_I \approx 3,65 \frac{P}{\sqrt{w}} \frac{1}{(1 - l/w)^{3/2}}. \quad (4a)$$

Приведенные соотношения в безразмерном виде показаны на рис. 2. В совокупности они дают существенную немонотонность изменения комплекса $\frac{K_I \sqrt{w}}{P}$ при увеличении размеров разрыва, причем его минимум наблюдается при $l/w \approx 0,12-0,15$. При этом $\frac{K_I \sqrt{w}}{P} \approx 4$. В описываемой постановке задачи параметры экстремума постоянны.

Это означает, что при известных трещиностойкости льда K_{IC} и поперечном размере ледового образования w погонная нагрузка для его раскалывания определяется простым соотношением

$$P \approx \frac{K_{IC} \sqrt{w}}{4}. \quad (5)$$

При этом длина растущей трещины в момент перехода к неустойчивой фазе значительно меньше размера раскалываемого объекта. Последнее объясняет слабую чувствительность разрушающей нагрузки к форме границы айсберга, противоположной области инициирования разрыва.

Соотношение (5) близко к эмпирической оценке сопротивления при движении ледокола через крупнобитый лед. На рис. 3 приведено сравнение этой оценки по [9, 13] и (5) при значении $K_{IC} = 0,1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$ (трещиностойкость морского льда, по данным различных авторов, находится в диапазоне $K_{IC} = 0,05-2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$, причем с увеличением масштаба разрушения – толщины разрушаемого образца – она изменяется от нижних значений к верхней границе диапазона [14]). Расхождение предельной нагрузки в области малых размеров льдин объясня-

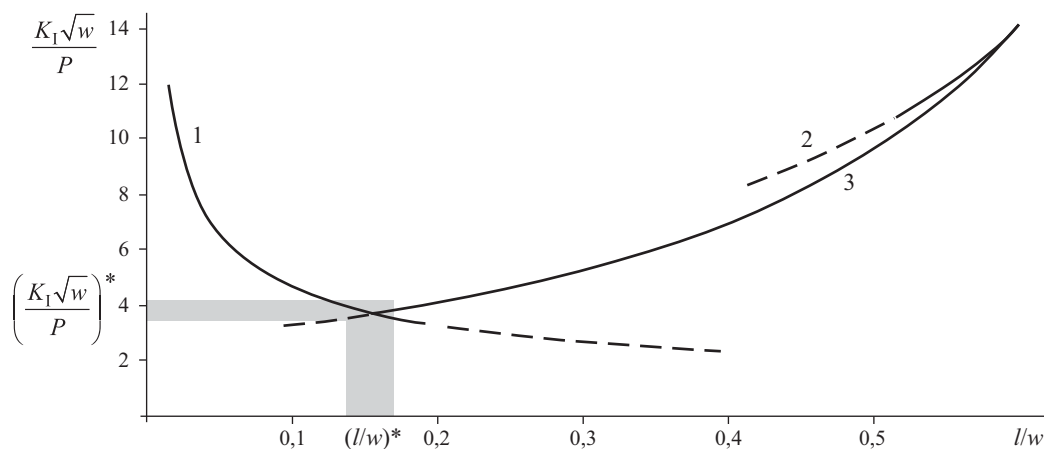


Рис. 2. Характер изменения КИН при локальном воздействии на плоский (столбобразный) айсберг: 1 – по (1); 2 – по (3); 3 – по (4)

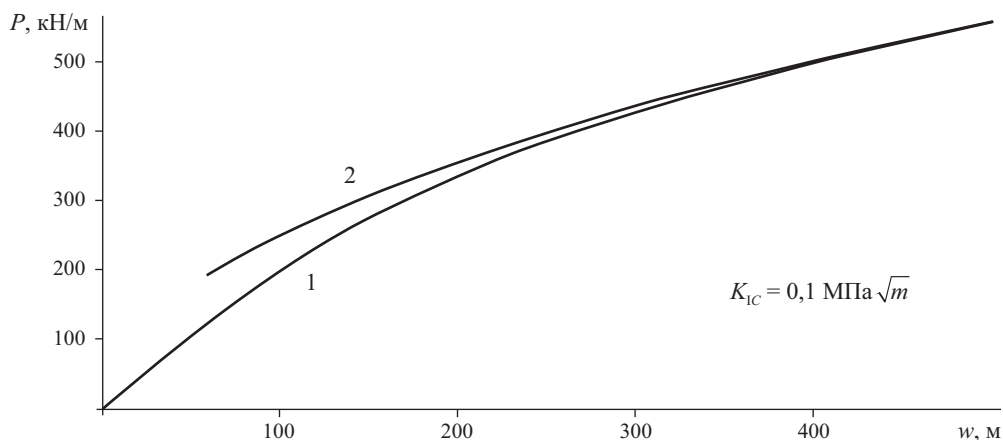


Рис. 3. Сравнение предельной нагрузки по (5) (кривая 2) и эмпирических данных о раскалывании крупнобитого льда ледоколом по [13] (кривая 1)

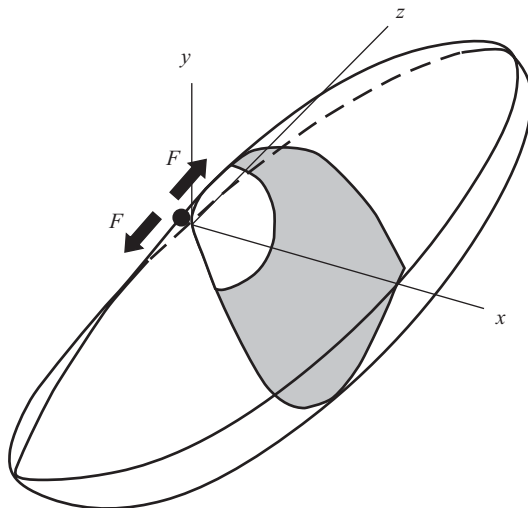
ется изменением схемы нагружения при значительном относительном внедрении ледокола в лед [9], а также возможным влиянием разрушения льда при локальном изгибе.

Заметим, однако, что приведенный результат справедлив для объекта, имеющего форму параллелепипеда, и его применение к объему произвольной формы связано с необходимостью оценки параметров эффективного параллелепипеда. Как показано выше, при этом можно использовать упрощающие факторы – слабое влияние формы удаленной границы и поперечного размера объекта выпуклой формы, если поперечный размер превышает продольный. Основным влияющим фактором в таком варианте остается форма вертикального сечения плоскости предполагаемого раскола. Для характерных вариантов сечения может быть предложена серия шаблонов. В результате соотношение приобретает вид

$$P \approx mK_{IC}\sqrt{w}, \quad (6)$$

где m – коэффициент формы.

В случае более сложных форм при использовании локализованного в малой области источника раскалывающих сил представляется удобным перейти к определению величины максимальной силы раскалывания в предположении, что фронт разрыва по толщине айсберга имеет форму плоской дуги с центром в области приложения сосредоточенной нагрузки и ориентирован по нормали к горизонтальной плоскости (рис. 4).



Напомним, что при определении эффективных значений коэффициента интенсивности напряжений в задачах о трещинах в геометрически неограниченной упругой среде наибольшее влияние имеет длина фронта растущей трещины, причем при локализованных нагрузках конфигурация трещины стремится к круговой как имеющей наименьшую длину фронта. Для иллюстрации сравним, например, коэффициенты интенсивности напряжений в плоской и осесимметричной задаче при нагрузке, создаваемой сосредоточенными силами [15] (рис. 5).

Нагрузка предельного равновесия дается соответственно формулами

$$F_1 = K_{IC}\sqrt{\pi l}; \quad (7)$$

$$F = K_{IC}(\pi r)^{3/2}. \quad (8)$$

При $r = l$ соотношения (7) и (8) различаются на множитель πr , т.е. на длину полуокружности фронта трещины, описываемой каждой из концевых областей плоской трещины при повороте вокруг поперечной оси на угол π . Заметим, что такой подход имеет оценочный характер, поскольку не учитывает влияния локальных возмущений напряженного состояния в областях выхода трещины на свободную поверхность в ограниченном теле. Воспользуемся такой оценкой в рассматриваемой задаче. Пусть контур сечения айсберга в надводной и подводной частях приближенно описывается двумя выпуклыми кривыми $y_1 = f_1(x)$ и $y_2 = f_2(x)$.

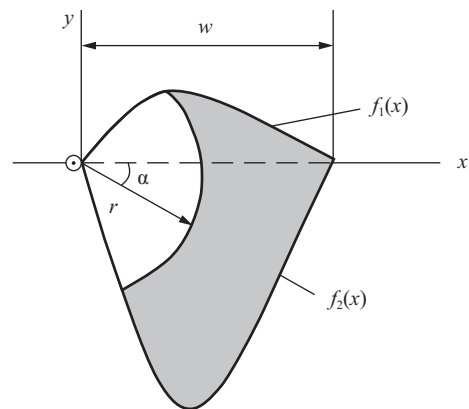


Рис. 4. Схема геометрической ситуации для оценки раскалывающего усилия.
Справа – сечение ледового массива в плоскости раскалывания

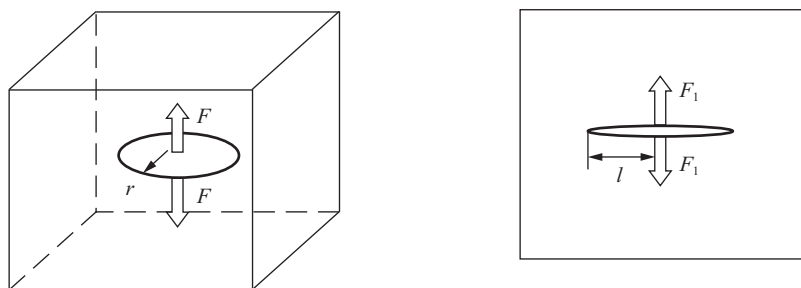


Рис. 5. Схема пространственной и плоской задач о трещине под действием сосредоточенной нагрузки

Если область воздействия находится вблизи ватерлинии, фронт трещины будет состоять из двух дуг одного и того же радиуса, а их общая длина может быть оценена из соотношения

$$L = (\alpha_1 - \alpha_2)x; \quad \alpha_1 = \arctg\left(\frac{f_1(x)}{x}\right); \quad \alpha_2 = \arctg\left(\frac{f_2(x)}{x}\right). \quad (9)$$

В таком случае (1) и (4а) принимают вид:

$$K_1 \sim \frac{0,825F}{L(r/w)} \sqrt{\frac{\pi}{r}}; \quad (10)$$

$$K_1 \sim \frac{F}{L(r/w)\sqrt{w}} \frac{3,65}{(1-r/w)^{3/2}}. \quad (11)$$

Минимальное значение K_1 , определяющее уровень максимального усилия при раскалывании монолитного столбовидного айсберга, как показано выше, наблюдается в области значений r/w , в которой величины K_1 , полученные из (1) и (4), совпадают. По отношению к (10), (11) в общем виде это не так. Для выпуклого контура сечения айсберга критическое соотношение радиуса растущей трещины и ширины айсберга $(r/w)^*$, при котором происходит переход к неустойчивому росту трещины, значительно возрастает и может выйти за рамки возможной применимости асимптотического приближения (10).

Приведем иллюстративный пример для контура сечения айсберга

$$f_1 = A_1 \sin\left(\frac{\pi x}{w}\right); \quad f_2 = -A_2 \sin\left(\frac{\pi x}{w}\right), \quad (12)$$

где A_1 и A_2 – амплитуды надводного и подводного гребней айсберга ($A_1 \sim A_2/8$).

Тогда из (9) и (12) получим:

$$L = x \left(\arctg\left(\frac{A_1}{w} \left(\frac{w}{x}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{w}\right)\right) + \arctg\left(\frac{A_2}{w} \left(\frac{w}{x}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{w}\right)\right) \right). \quad (13)$$

На рис. 6 показан пример оценки комплекса $\frac{K_1\sqrt{w}}{F}$ по (10), (11). Можно видеть,

что его минимальное значение не совпадает с областью пересечения функций, а относится к экстремуму функции (11).

Соотношение между A_1/w и $(r/w)^*$ показано на рис. 7. Можно видеть, что в значимом диапазоне параметра A_1/w отношение $(r/w)^*$ меняется в пределах величин $0,32 \pm 0,02$. В таком случае предельная разрывающая локальная нагрузка может быть оценена с точностью порядка 5 % по соотношению

$$F \approx mK_{IC} w\sqrt{w} \left(\arctg\left(2,63 \frac{A_1}{w}\right) + \arctg\left(2,63 \frac{A_2}{w}\right) \right); \quad m \approx 0,049. \quad (14)$$

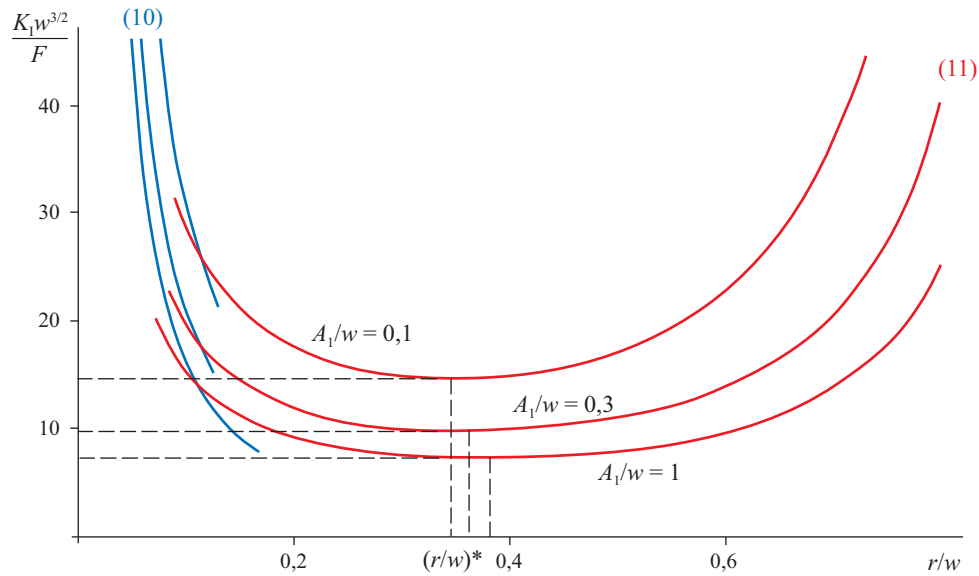


Рис. 6. Условия предельного равновесия при разрушении ледового массива сосредоточенными нагрузками ($A_2/A_1 = 8$)

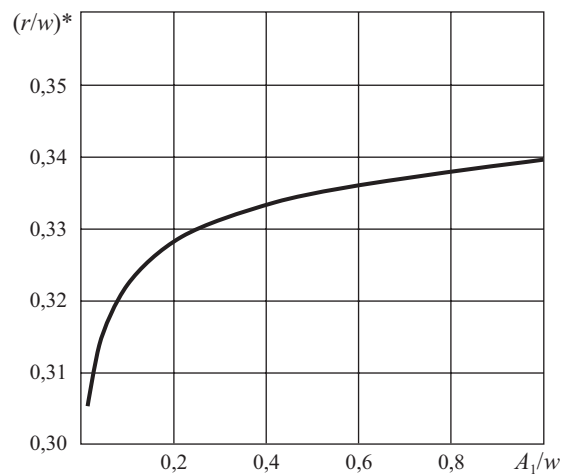


Рис. 7. Соотношение между A_1/w и $(r/w)^*$

Приведенные оценки показывают, что для раскалывания айсберга указанной формы необходимо создать значительные нагрузки в области контакта. Например, если его ширина $w \sim 100$ м, при соотношении амплитуд килля и паруса $A_2/A_1 \sim 8$, $A_1/w = 0,1$ и трещиностойкости льда $K_{IC} = 0,2$ МПа·м^{0,5} [14] в устье начального разрыва требуется разрывающая нагрузка около 10–15 МН. На площади около 1 м² такая нагрузка создает среднее давление 10–15 МПа. На рис. 8 показана взаимосвязь разрушающей нагрузки и параметра A_1/w при характерных соотношениях размеров килля и паруса айсберга.

Данные о механизмах разрушения льда могут быть полезны при разработке средств защиты от опасности со стороны массивных ледяных объектов. В частности, свойства энерго-

емкости разрушения и последующего деформирования разрушенного льда дают основания для проектирования пассивных средств защиты в виде искусственного промежуточного слоя между сооружением и ледяным массивом. Такой промежуточный энергопоглощающий слой может быть составлен как из демпфирующих элементов в конструкции сооружения, так и из мелкобитого льда в его окрестности. Задачей промежуточного слоя является торможение, остановка или разворот надвигающегося массива льда.

При анализе активных средств защиты представляет интерес возможность оперативного воздействия на ледовый массив с целью изменения геометрии или траектории движения путем его раскалывания. Такая технология

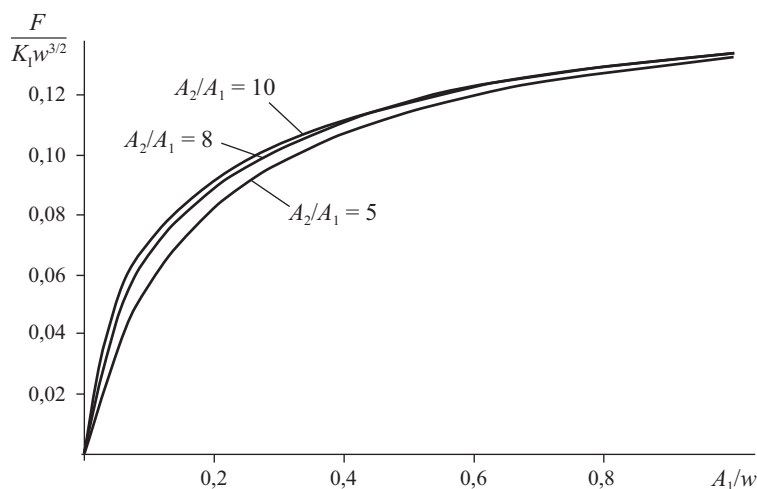


Рис. 8. Взаимосвязь раскалывающей нагрузки и геометрических параметров

является одной из наиболее распространенных в механике разрушения, поскольку распространение в монолитной среде одиночного магистрального разрыва путем локализованного механического воздействия требует наименьших затрат энергии. Выше показано, что для раскалывания столбовидного айсберга или многолетнего льда достаточно создать в нем трещину, отношение длины которой к поперечному размеру ледяного массива составляет примерно 0,15. Для массива с выпуклой формой надводной и подводной частей эта доля несколько больше (~ 0,35). Задача, таким образом, сводится к созданию расклинивающих сил необходимой величины на пятне контакта. Так, в рассмотренном примере разрушение ледяного массива шириной 100 м требует усилия 10–15 МН, которое на площадке контакта размером 1 м² создает давление по-

рядка 10–15 МПа. Давление такого уровня, намного превышающее прочность льда при одноосном сжатии, лед способен выдержать при деформировании в стесненных условиях, создаваемых в центре области обширного плоского контакта.

Представляется, что используемые методы вероятностной оценки нагрузок от крупномасштабных ледовых образований (например, по [16]) необходимо дополнить анализом возможных сценариев взаимодействия, учитывающих развитие процессов разрушения льда элементами пассивной и активной защиты конструкции.

Результаты работы могут быть использованы для разработки методики физического моделирования процессов взаимодействия сооружений с ледяными массивами и для оценки ледовых нагрузок.

Список литературы

1. СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения. – М.: ГП ЦПП, 1995. – 45 с.
2. ISO 19906. Arctic offshore structures. – 2010. – 465 р.
3. Гольдштейн Р.В. Трещиностойкость и разрушение ледяного покрова ледоколами / Р.В. Гольдштейн, Н.М. Осипенко // Тр. ААНИИ. – Т. 391. Ледовые качества судов. – 1985. – С. 137–157.
4. Goldstein R.V. Fracture mechanics in modeling of icebreaking capability / R.V. Goldstein, N.M. Osipenko // J. Cold Regions Eng. – 1993. – V. 7. – № 2. – P. 33–43.
5. Ледяные образования морей западной Арктики. – СПб: ААНИИ, 2006. – 272 с.
6. Гудошников Ю.П. Вопросы обеспечения безопасности морских инженерных сооружений от айсбергов / Ю.П. Гудошников, Г.К. Зубакин, А.В. Чернов // Морская биржа. – 2008. – № 3 (25). – <http://www.maritimemarket.ru>.
7. Кульмач П.П. Морские сооружения для освоения полярного шельфа / П.П. Кульмач. – М.: ЦНИИ МО РФ. 1999. – 336 с.
8. Гольдштейн Р.В. О модели разрушения льда при большой площади контакта / Р.В. Гольдштейн, Н.М. Осипенко // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2011. – № 1. – С. 137–153.

9. Гольдштейн Р.В. Механика разрушения льда и некоторые ее приложения / Р.В. Гольдштейн, Н.М. Осипенко // Вестник Новосибирского государственного университета. – 2012. – № 4. – С. 42–48. – (Математика, механика, информатика).
10. Jordan I.J. Mechanics of ice-structure interaction / I.J. Jordan // Eng. Fract. Mech. – 2001. – V. 68. – P. 1923–1960.
11. Гольдштейн Р.В. Механика разрушения и некоторые вопросы разрушения льда / Р.В. Гольдштейн, Н.М. Осипенко / Механика и физика льда. – М.: Наука, 1983. – С. 65–94.
12. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. – Т. 1 / под. ред. Ю.М. Мураками. М.: Мир, 1990. – 448 с.
13. Каштелян В.И. Сопротивление льда движению судна / В.И. Каштелян, И.Н. Позняк, А.Я. Рывлин. – Л.: Судостроение, 1968. – 240 с.
14. Dempsey J.P. Scale effects on the in-situ tensile strength and fracture of ice. – P. II: First – year sea ice at Resolute, NWT / J.P. Dempsey, R.M. Adamson, S.V. Mulmule // Int. J. Fracture. – 1999. – V. 95. – P. 347–366.
15. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
16. Fuglem M. Iceberg – structure interaction probabilities for design / M. Fuglem, I. Jordaan, G. Crocker // J. Civ. Eng. – 1996. – V. 23. – P. 231–241.

Ведущий мировой разработчик и
производитель оборудования для
подводно-технических работ



www.smd.co.uk



HEAD OFFICE & HEAVY PRODUCTION
SOIL MACHINE DYNAMICS LTD
TURBINIA WORKS, DAVY BANK,
WALLSEND, TYNE & WEAR, NE28 6UZ, UK

T +44 191 234 2222 | E INFO@SMD.CO.UK

