

УДК 629.124

DOI: 10.46960/2782-5477_2022_4_25

А.С. Себин, К.Д. Блинов, Ю.А. Двойченко
**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО
МОДЕЛЬНОГО ЛЬДА (GP-ICE) БОЛЬШИХ ГЛУБИН ПРОМОРОЗКИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты экспериментального исследования процесса разрушения композитной модели ледяного покрова (GP-ice), составленной из сферических гранул полиэтилена диаметром 20 мм, уложенных в один слой. Глубина проморозки гранул составила 25 и 22 мм. Производилось центральное нагружение ледяной пластины, намораживаемой в круглом бассейне в условиях естественного холода. Получены диаграммы разрушения сила-прогиб, произведен их анализ. Характер полученных диаграмм близок к натурным. Полученные в экспериментах данные могут быть использованы при разработке физической модели ледяного покрова в целях исследования взаимодействия судов и инженерных сооружений с ледовыми образованиями.

Ключевые слова: лед, ледокол, ледяной покров, физическое моделирование, модель льда, ледовый бассейн, опытовый бассейн, теория подобия.

1. Введение

Современные тенденции развития инфраструктуры замерзающих акваторий северных регионов России обуславливают высокую потребность в современных ледоколах, способных обеспечить гарантированную проводку судов, а также в морских ледостойких инженерных сооружениях, способных безопасно круглогодично эксплуатироваться в условиях Арктики. Мощность энергетической установки таких судов, а также глобальная сдвиговая нагрузка на сооружения определяются в наибольшей степени силами, действующими со стороны льда. На текущий момент наиболее точным и распространенным способом определения величины этих сил является модельный эксперимент в ледовом опытовом бассейне.

Высокая практическая значимость этого вопроса определяет текущий интерес исследователей к данной проблеме [1-4]. В современной практике проведения модельных испытаний отсутствует единый подход к физическому моделированию ледяного покрова: все модели обладают рядом недостатков, мешающих их универсальному применению для целого ряда задач [5]. В НГТУ им. Р.Е. Алексеева на кафедре «Кораблестроение и авиационная техника» была предложена модель ледяного покрова композитной конструкции GP-ice [6], представляющая собой гранулы полиэтилена высокого давления, скрепленные между собой слоем пресноводного льда (рис. 1).

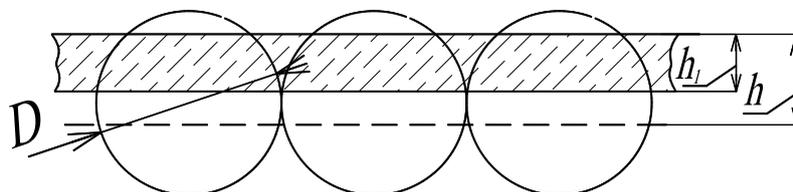


Рис. 1. Композитная модель ледяного покрова GP-ice, составленная из сферических гранул диаметром $D=20$ мм, уложенных в один слой:
 h_1 – глубина проморозки, h – приведенная толщина (объем композитного льда в бассейне, отнесенный к покрытой льдом площади), D – диаметр сферической гранулы

Такая структура модели позволяет контролировать не только отдельные прочностные свойства, но и энергетические затраты на разрушение ледяного покрова в целом, характер его разрушения, приближая их к требуемым. Это может быть востребовано не только при

исследовании ледовой ходкости судов, но и при прогнозировании ледовых нагрузок на морские инженерные сооружения, так как характер разрушения льда при контакте с ними меняется в зависимости от ряда параметров [7, 8].

2. Моделирование ледяного покрова

Одним из способов формулирования критериев подобия при проведении модельных исследований ледовой ходкости судов, а также ледовых нагрузок на морские инженерные сооружения является метод нормализации теории подобия [5, 9]. Если изгиб натурального ледяного покрова и модельного поля льда можно описать в рамках единой математической модели, то моделирование сводится к обеспечению подобия механических параметров материалов (натурального льда и материала физической модели). В этих целях рядом исследователей [5, 10, 11] используется уравнение изгиба упругой пластинки на гидравлическом основании:

$$D\nabla^2\nabla^2w = q(x, y) - \gamma w, \quad (2.1)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость пластины; E – модуль упругости; h – толщина пластины; ν – коэффициент Пуассона; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – оператор Лапласа; $q(x, y)$ –

действующая на пластину поперечная нагрузка; γ – коэффициент упругого основания.

Дальнейший поиск критериев подобия проходит по пути приведения рассматриваемого уравнения к безразмерному виду и анализу полученных коэффициентов. Условием является равенство коэффициентов Пуассона натуре и модели $\nu_m = \nu_n$. Отметим, что в [5] для вывода критериев используется уравнение для случая ненагруженной пластины, в [10] для пластины, нагруженной усилиями, направленными вдоль трех осей (F_x, F_y, F_z) , а в [11] уравнение изгиба пластины под действием только поперечной нагрузки. В последнем случае критерии подобия выглядят следующим образом:

$$K_1 = \frac{D}{\gamma l^4} = idem; K_2 = \frac{P}{\sigma h^2} = idem; K_3 = \frac{wh}{l^2} = idem, \quad (2.2)$$

где l – характерный линейный размер.

В конечном итоге все авторы приходят к схожим результатам. Если масштабы линейных размеров в плане, а также прогибов и толщин одинаковы, соотношения масштабов моделирования пластины будут выглядеть следующим образом:

$$\lambda_E = \lambda_\sigma = \lambda_l, \quad \lambda_p = \lambda_l^3, \quad (2.3)$$

где λ_E – масштаб моделирования модуля упругости; λ_σ – масштаб моделирования напряжений; λ_l – масштаб моделирования линейных размеров; λ_p – масштаб моделирования действующих сил.

Эти соотношения можно получить другими путями: методом масштабов и методом сил теории подобия, методами теории размерностей, а также рассмотрением более общих уравнений теории упругости [5, 12, 13, 14]. Если же они неодинаковы, то для выполнения подобия картины действующих напряжений необходимо, чтобы масштаб моделирования толщин льда удовлетворял следующему соотношению:

$$\lambda_h = \lambda_l^{4/3} \quad (2.4)$$

Если в качестве математической модели используется уравнение упругопластических деформаций пластины [11]:

$$\nabla^2 \nabla^2 w - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \Omega \right] - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \Omega \right] - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \Omega \right) = \frac{q(x, y) - \gamma w}{D}, \quad (2.5)$$

$$\Omega = \sum_{n=1}^n \frac{3\Psi_{2n}}{2n+3} \left(\frac{xh}{\sqrt{3}} \right)^{2n}, \quad (2.6)$$

где $\Psi \frac{E - E_1}{E}$ – параметр разупрочнения,

тогда критерии подобия (2.2) должны быть дополнены:

$$\Omega = idem, \quad (2.7)$$

что характеризуется автором как требование подобия интенсивности напряжений и деформаций в натуре и модели при подобии режимов нагружения.

Другой способ получения критериев основан на методе функционального подобия [15]. Необходимыми исходными данными для выявления зависимостей, лежащих в основе этого метода, служат закономерности между энергетическими параметрами процесса разрушения модельного ледяного покрова и его структурными параметрами (толщина, размеры и тип включений, соленость и т.п.).

Идея композитной модели ледяного покрова в первую очередь основана на использовании материала оригинальной конструкции, позволяющего достаточно гибко манипулировать различными параметрами процесса разрушения. Для формирования методики моделирования, обеспечивающей проведение модельных испытаний ледокольных судов и ледостойких инженерных сооружений, используя тот или иной метод теории подобия, необходимо провести ряд экспериментальных исследований разрушения композитного льда.

3. Экспериментальное оборудование

Достаточно большой объем исследований был реализован в малом ледовом бассейне НГТУ, установленном в термокамере [16]. Однако эксперименты по разрушению композитного ледяного покрова с высоким глубинами проморозки (более 8 мм) необходимо проводить в бассейне с более значительным размером чаши. Стоимость организации таких опытов может быть существенной, поэтому использовался бассейн с естественным охлаждением. Эксперименты проводились в круглом ледовом бассейне НГТУ, который имеет форму цилиндра диаметром 4,4, глубиной 0,7 м. На его планшюре смонтирована ферма с установленным и жестко закрепленным прессом, который использовался для нагружения модельного ледового покрова. Прессом служит испытательная машина УММ-5 с предельной нагрузкой в 49 кН.

Пролом ледового поля осуществлялся штампом, закрепленным на нижней части винтового штока пресса. В качестве привода испытательной машины использовался двухскоростной асинхронный электродвигатель А032. Общий вид бассейна представлен на рис. 2. На штоке пресса был установлен силоизмеритель с S-образным тензометрическим датчиком силы с предельным значением в 3000 Н. Нагрузка на лед передавалась через штамп диаметром 200 мм. Для измерения линейного перемещения штока использовался тросиковый датчик реостатного типа с длиной троса 200 мм. Перед проведением эксперимента все датчики были проградуированы, точность измерения перемещения составляла $\pm 0,02$ мм, силы ± 2 Н. Датчики были подключены к измерительной системе по дифференциальной схеме. Показания регистрировались с помощью самопишущего вольтметра «Flash-Recorder-3 М3». Сигнал тензометрического датчика усиливался милливольтовым предусилителем LP-04-М.

Общая схема экспериментальной установки представлена на рис 3.



Рис. 2. Стенд для изучения физико-механических свойств ледяного покрова

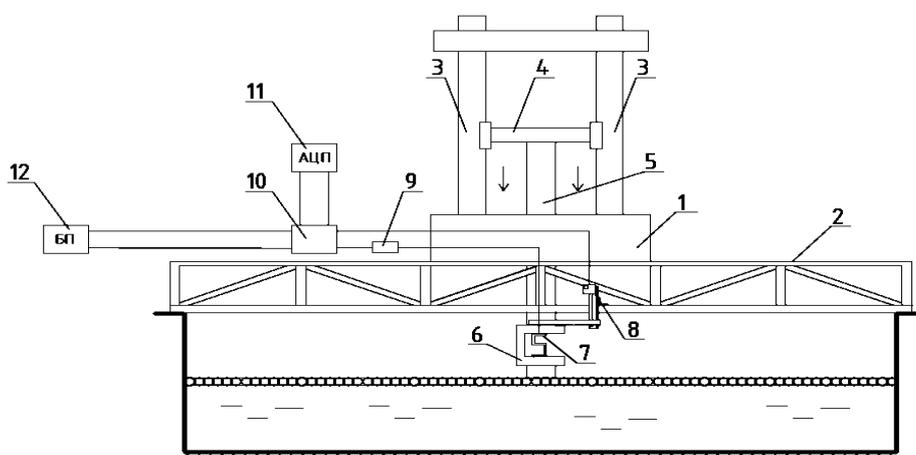


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

для проведения исследований разрушения композитной модели льда:

- 1 – станина; 2 – опорная ферма пресса; 3 – колонны; 4 – подвижная траверса; 5 – винт;
 6 – силоизмеритель; 7 – S-образный датчик силы; 8 – тросиковый датчик перемещения;
 9 – усилитель LP-04-M; 10 – коммутационное устройство; 11 – Flash-Recorder-3 M3;
 12 – аккумуляторный блок питания

4. Эксперименты по разрушению композитной модели льда

В начале опыта в бассейн с налитой водой высыпались гранулы полиэтилена, которые затем разравнивались до положения, как можно более близкого к наиболее плотной укладке сферических гранул в один слой. Поскольку опыты производились на улице при естественном холоде, сразу же после окончания процесса укладки в пространстве между гранулами начиналось образование льда. После достижения необходимой глубины проморозки включалось экспериментальное оборудование, измерительная система и производился эксперимент по разрушению ледяного покрова.

По окончании опытов бассейн очищался от остатков льда; далее необходимо было извлечь гранулы полиэтилена, остающиеся вмороженными в обломки, так как они должны были использоваться в последующих экспериментах. Для этого была предусмотрена плавильная станция, представлявшая собой бак, в котором размещались обломки льда с гранулами. После завершения таяния льда гранулы извлекались, и эксперименты повторялись заново.

Эксперименты производились по схеме «центральный пролом» – нагрузка от пресса через шток прикладывалась к центру ледяной пластины (рис. 4, а). Нагружение производилось по кинематическому принципу, что позволило получить запись всей диаграммы разрушения. Скорость движения штока составляла 25 мм/мин, средняя температура воздуха, при которой производились опыты, $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

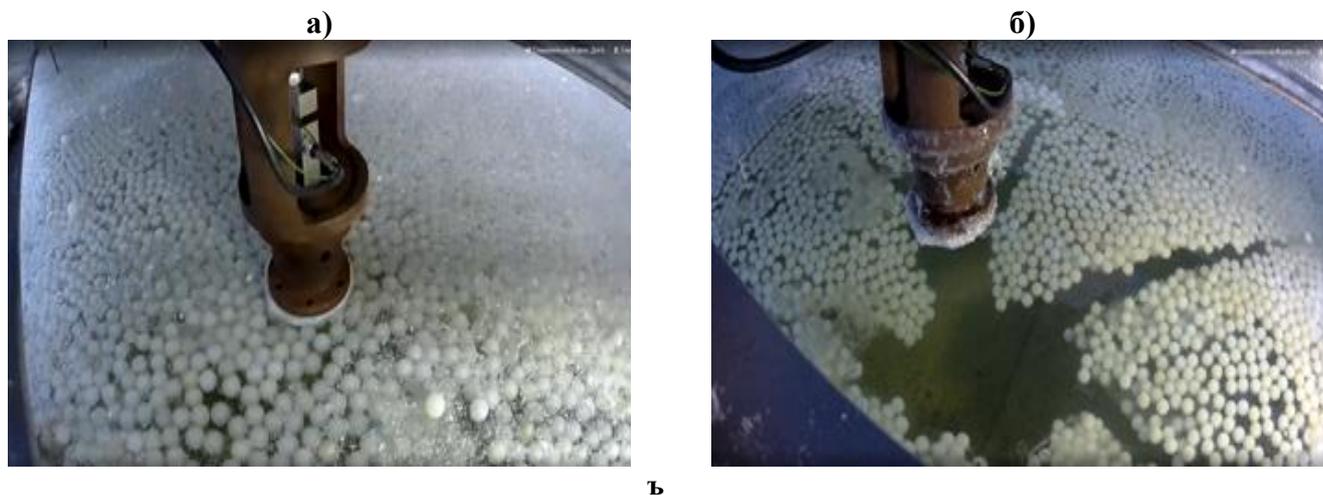


Рис. 4. Эксперимент по разрушению композитной модели льда:
а) начало опыта; б) конец опыта

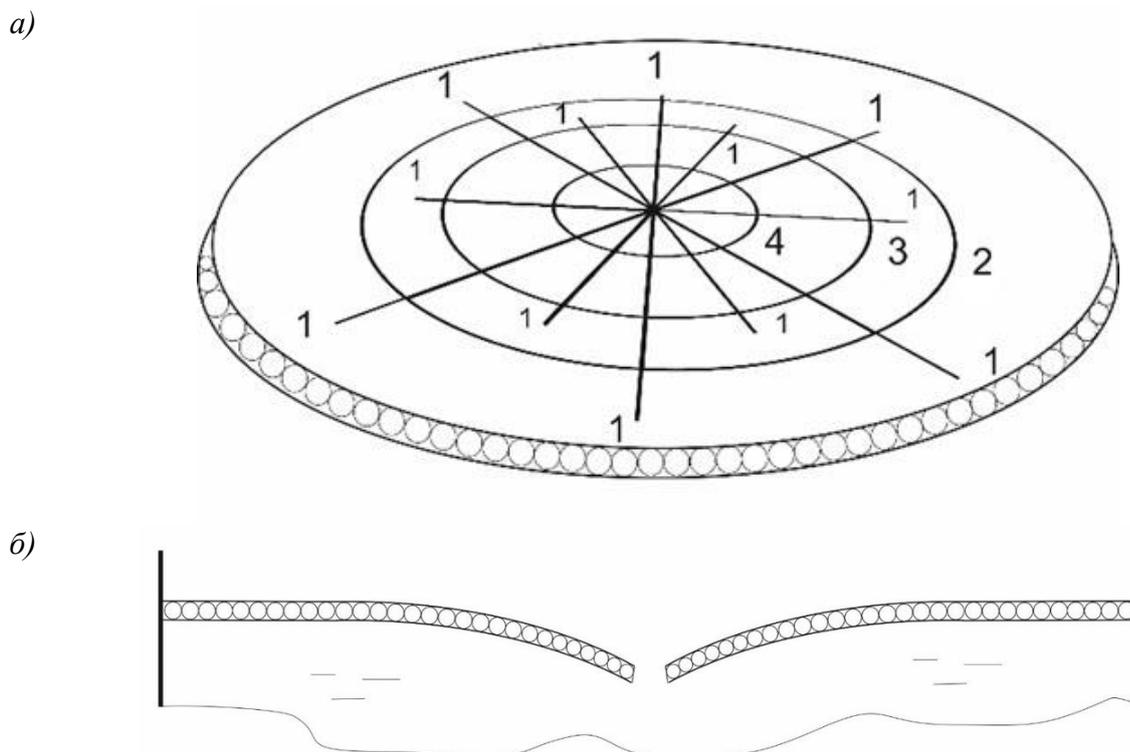


Рис. 5. Схема образования магистральных трещин во льду при проведении эксперимента:

а) – схема образования трещин во льду: 1-4 – порядок образования трещин;
б) форма ледового поля в конце опыта

В начале эксперимента при приложении нагрузки ледяной покров деформировался, затем наблюдалось магистральное трещинообразование – сначала образовывалось 8 радиальных трещин, затем последовательно, в направлении от борта бассейна к месту приложения нагрузки возникало 3 кольцевых трещины (рис. 5 а). Далее, по мере увеличения пути, пройденного штоком, вдоль берегов радиальных трещин происходило отделение участков ледяного покрова друг от друга, образовывались ледовые клинья. Наблюдалось медленное, пластичное разрушение ледовых клиньев, принимавших в процессе дугообразную форму (рис. 5 б). Следует отметить, что, в отличие от наблюдаемого на натурном льду, композитный ледяной покров не разделялся на независимые блоки, не возникало эффекта расклинивания обломков, что, возможно, не приводило к повышению несущей способности за счет арочного эффекта. Ледовые клинья не распадались по месту прохода всех кольцевых трещин, раскрытие берегов происходило только на дальних по отношению к нагрузке трещинам. Клинья продолжали изгибаться так, как будто других магистральных кольцевых трещин не существовало, длина клина была ограничена длиной радиальной трещины (рис. 4 б).

При проведении опытов не удалось зафиксировать момент окончательного разрушения ледяного покрова, связанный с выворачиванием обломков льда. Ледовые клинья, изгибаясь, вышли из контакта с опорной площадкой силонагрузжателя раньше, чем произошло их окончательное отделение от ледяного покрова, поэтому полученные диаграммы разрушения (рис. 5) оказались прерванными. Эксперимент заканчивался при потере контакта площадки силонагрузжателя со льдом. После снятия нагрузки ледовые клинья оставались в том же положении, что и при нагружении (рис. 4 б). После разрушения льда производился замер глубины проморозки гранул в месте приложения усилия и в характерных точках. В результате проведения опытов были получены диаграммы разрушения композитного ледяного покрова с глубинами проморозки 25 и 22 мм (рис. 6).

5. Анализ результатов экспериментов

Для анализа полученных диаграмм использовалась методика [5, 15, 17], подразделяющая график на два интервала: критическую часть и закритическую. Точкой разделения служит значение критической пиковой нагрузки ($F_{кр}$), действующей на лед и соответствующего ей критического прогиба ($w_{кр}$). Для обоих интервалов, а также для всей диаграммы в целом, рассчитывалось значение работы, затраченной на деформацию и разрушение ледяного покрова:

$$A_{tot} = A_{кр} + A_{закр}; \quad A_{кр} = \int_0^{w_{кр}} F dw; \quad A_{закр} = \int_{w_{кр}}^{w_{max}} F dw, \quad (5.1)$$

где $A_{кр}$, $A_{закр}$, A_{tot} – работа разрушения критической, закритической частей и всей диаграммы в целом; $w_{кр}$, w_{max} – критический и максимальный прогибы льда в точке приложения нагрузки.

Анализ закритической части диаграмм осуществлялся при помощи линейной экстраполяции значений до пересечения с горизонтальной осью. Форма диаграммы разрушения оценивалась с помощью коэффициентов, представляющих собой коэффициенты полноты частей диаграммы:

$$k_{кр} = \frac{A_{кр}}{F_{кр} w_{кр}}; \quad k_{закр} = \frac{A_{закр}}{F_{кр} (w_{max} - w_{кр})}; \quad k_{tot} = \frac{A_{tot}}{F_{кр} w_{max}}, \quad (5.2)$$

где $k_{кр}$, $k_{закр}$, k_{tot} – коэффициенты формы критической, закритической частей и всей диаграммы в целом.

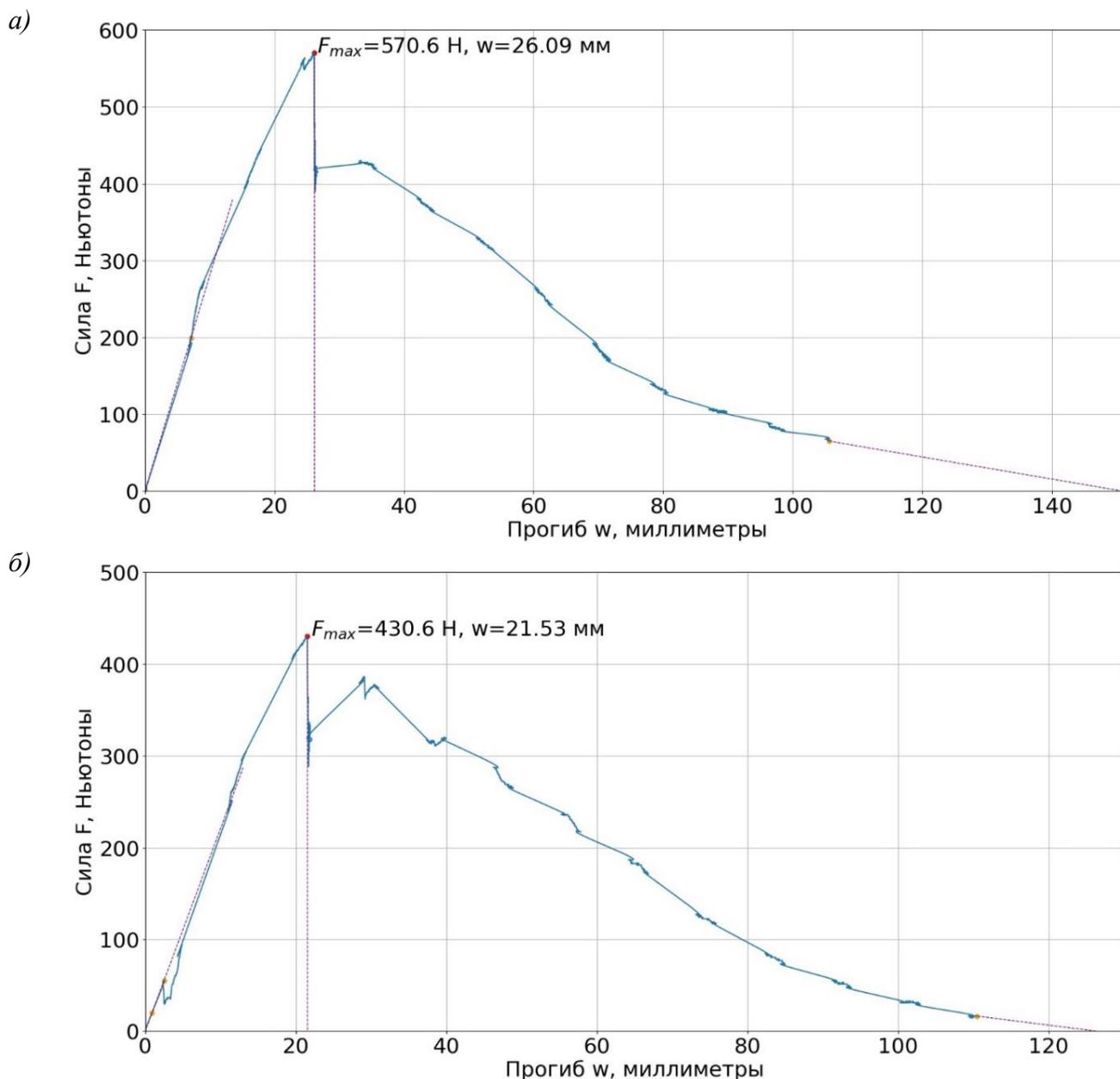


Рис. 6. Диаграмма разрушения композитного ледяного покрова, составленного из сферических гранул диаметром 20 мм с глубиной проморозки:
a) – 25 мм; б) – 22 мм

Также оценивался вклад критической части процесса в общие энергетические затраты по разрушению ледяного покрова:

$$A_{кр} / A_{tot} \quad (5.3)$$

Начальная часть диаграмм рис. 6 представляет собой линейный участок, не нарушенный экстремумами. Такая форма характерна для упругой деформации тела, подчиняющейся закону Гука, следовательно, можно попытаться оценить упругие характеристики композитного льда на начальной стадии нагружения, используя решение Герца, полученное для случая центрального нагружения бесконечной тонкой упругой пластины, покоящейся на основании винклеровского типа [5]:

$$D = \frac{1}{\rho g} \left(\frac{F}{8w} \right)^2, E = \frac{12D(1-\nu^2)}{h^3}, r_0 = \left(\frac{\rho g}{D} \right)^{-1/4}, \quad (5.4)$$

где D , Н·м – цилиндрическая жесткость пластины; E , Па – модуль упругости; r_0 , м – характерный линейный размер изгиба; $\rho = 1000$ кг/м³ – плотность упругого основания, в данном случае пресной воды; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; F , Н и w , м – сила и соответствующий ей прогиб льда, взятые на линейном участке диаграммы, h , м – толщина пластинки, в данном случае используется приведенная толщина льда, т.е. суммарный объем гранул и естественного льда в бассейне, отнесенный к площади бассейна; ν – коэффициент Пуассона материала пластинки. Поскольку вычисление коэффициента Пуассона для композитного льда в настоящий момент затруднительно и, как правило, значение ν^2 для льда оказывается значительно меньше, чем $12D/h^3$, в данной работе принято $\nu^2 \approx 0$.

Результаты численного расчета диаграмм по изложенным выше выражениям приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры диаграмм разрушения

Параметр	$F_{кр}$, Н	$w_{кр}$, мм	w_{max} , мм	$A_{кр}$, Дж	A_{tot} , Дж	$A_{кр}/A_{tot}$
22 мм	430,6	21,53	126,3	4,886	21,18	0,231
25 мм	570,6	26,09	150,9	8,51	28,72	0,296
Параметр	$k_{кр}$	$k_{закр}$	k_{tot}	r_0 , м	D , Н·м	E , МПа
22 мм	0,527	0,361	0,389	0,53	775,5	672,9
25 мм	0,572	0,284	0,334	0,598	1252	751,6

Полученные диаграммы разрушения имеют куполообразную форму с преобладающей закритической частью. Уменьшенные по сравнению с натурным льдом [18] величины $A_{кр}/A_{tot}$ говорят о преобладающем вязком характере разрушения. Это может быть обусловлено как свойствами льда, скрепляющего гранулы, так и специфическими свойствами композита. Известно, что пластические свойства льда проявляются при низкой скорости его нагружения [19]. В выполненных экспериментах скорость нагружения составляла 25 мм/мин, что ниже скоростей чисто упругих деформаций. Тем не менее, характер полученных графиков – длинная закритическая относительно монотонная часть в совокупности с резким скачкообразным падением силы на 25 % сразу после максимума – не может быть объяснен только лишь свойствами материала и должен быть обусловлен наличием в конструкции сферических гранул диаметром 20 мм. Как описывалось выше, наличие магистральных кольцевых трещин во льду не приводило к отделению обломков. Ледовые клинья продолжали деформироваться, удерживаясь только за счет наличия сферических гранул. Клин как бы проворачивался на них как на «шарнирах», удерживая таким образом связанность. Так, после окончания эксперимента можно было наблюдать следующий эффект: если, взяв в руки обломок клина, попытаться разделить его на части по уже существующей трещине, то можно было обнаружить, что это возможно сделать только провернув его по гранулам, тем самым раскрыв трещину, но даже после значительной степени раскрытия ее берегов обломок все равно сохранял связанность за счет поджатия гранулы к своему месту атмосферным давлением и нужно было дополнительно приложить значительное усилие для его окончательного разделения. При проведении подобных экспериментов с этими же гранулами, но при низких глубинах проморозки [20] такого эффекта не наблюдалось, разрушение ледяного покрова носило хрупкий характер.

Таким образом, скачкообразное падение величины прикладываемого усилия после достижения пика можно объяснить преодолением удерживающей силы сферических гранул и единовременным отделением ледовых клиньев друг от друга вдоль линии распространения радиальных трещин. Дальнейший плавный спад усилия в закритической части объясняется постепенным проворачиванием клиньев в совокупности с пластической деформацией льда.

При подготовке к проведению эксперимента не удалось достичь сравнимой с опытами в малом ледовом бассейне [20] равномерности укладки сферических гранул. На некоторых участках ледяного покрова наблюдалась неравномерность, что могло сказаться на получаемых результатах. Однако, т.к. толщина проморозки гранул была более значительна, чем при опытах в малом бассейне, степень этого влияния не должна была оказаться высокой.

6. Заключение

Экспериментально исследованы параметры разрушения композитной модели ледяного покрова при низких скоростях нагружения и высокой глубине проморозки. Выявлен эффект влияния формы и размеров полиэтиленовых гранул на процесс разрушения. Использование в конструкции композитного льда сферических гранул диаметром 20 мм при глубинах проморозки 20-25 мм приводит к значительному увеличению закритической части диаграммы разрушения и резкому скачкообразному спаду реакции льда после достижения максимума. Такой характер разрушения предположительно может быть использован для моделирования взаимодействия со льдом инженерных сооружений, расположенных на шельфе замерзающих морей, так как в подобных задачах требуется моделирование в том числе вязкого характера разрушения ледяного покрова. Для окончательного ответа на вопрос о возможности моделирования пластических свойств льда с помощью композитной модели ледяного покрова требуется дальнейшее всестороннее изучение параметров ее разрушения при различных вариантах конструкций.

Во время опытов одной из проблем стало наслаивание и неравномерное распределение гранул полиэтилена на некоторых участках зеркала бассейна в условиях естественного холода. В целях улучшения качества моделирования взаимодействия инженерных объектов со льдом необходимо совершенствование методов и разработка специальных устройств, способствующих получению более равномерного поля композитного льда.

Представленные исследования выполнены по проекту № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом» в рамках гранта РНФ.

Библиографический список

1. Ziemer, G. HSVA model ice – a status report [Текст] / G. Ziemer, T. Stange, Q. Hisette // Proceedings of OMAE 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. – Hamburg, Germany, 2022.
2. Wilkman, G. Ice Model Tests [Текст] / G. Wilkman, T. Leiviskä, R. A. Suojanen // Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering. – 2017. С. 1-21.
3. Денисов, В.И. Новые экспериментальные возможности Крыловского государственного научного центра по изучению ледовых воздействий на объекты морской техники [Текст] / В.И. Денисов, К.Е. Сазонов, О.Я. Тимофеев // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3. С.19.
4. Lau M. Review of ice modeling methodology / M. Lau, J. Wang, C. Lee // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions. – 2007.
5. Ионов, Б.П. Ледовая ходкость судов [Текст] / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб. : Судостроение, 2001. – 522 с.
6. Беляков, В.Б. Новая модель льда [Текст] / В.Б. Беляков // Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. – Горький: ГПИ, 1984. С. 48-52.

7. Dummer, B.S.A. Investigation of ice interactions on drilling rigs in Shallow water [Текст] / B.S.A. Dummer // Project report. – 2013.
8. Karlsson, S. Ice Forces on Cylindrical and Conical Columns [Текст] / S. Karlsson, P. Strindö. – 1985.
9. Варданын, Г.С. Основы теории подобия и анализа размерностей: учебное пособие [Текст] / Г.С. Варданын. – М.: Изд-во МИСИ им. В. В. Куйбышева, 1977. – 121 с.
10. Зуев В.А. К вопросу о моделировании движения судна в сплошном ледяном поле [Текст] / В.А. Зуев, М.Е. Рабинович, Е.М. Грамузов, Ю.А. Двойченко / Вопросы теории, прочности и моделирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. – Горький: Изд-во ГГУ им. Н. И. Лобачевского, 1978. С. 22-25.
11. Панфилов, Д.Ф. Экспериментальные исследования грузоподъемности ледяного покрова [Текст] // Известия ВНИИГ. 1960. Т. 64. С. 101-115.
12. Шиманский, Ю.А. Теория моделирования движения судна в сплошном ледяном поле. Современные вопросы ледоколостроения [Текст] / Ю. А. Шиманский. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 159 с.
13. Каштелян В. И. Сопротивление льда движению судна [Текст] / В.И. Каштелян, И.И. Позняк, А.Я. Рывлин. – Л.: Судостроение, 1968. – 238 с.
14. Шаповалов, Л.А. Моделирование в задачах механики элементов конструкций [Текст] / Л. А. Шаповалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
15. Себин, А.С. Обоснование подходов к физическому моделированию разрушения ледяного покрова в задачах исследования взаимодействия судов со льдом на основе метода функционального подобия [Текст] / А.С. Себин, Ю.А. Двойченко // Транспортные системы. 2021. №. – С. 28-38.
16. Зуев, В.А. Техника и технология исследований модельного льда в малом ледовом бассейне НГТУ им. Р.Е. Алексеева [Текст] / В.А. Зуев, Ю.А. Двойченко, А.С. Себин // Транспортные системы. 2019. №. 3. С. 39-47.
17. Зуев, В.А. Разрушение ледяного покрова [Текст] / В. А. Зуев, Е. М. Грамузов, Ю. А. Двойченко. – Горький.: ГПИ, 1989. – 86 с.
18. Зуев, В.А. Экспериментальные исследования разрушения ледяного покрова / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, Ю.А. Двойченко [Текст] // Вопросы теории, прочности и моделирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. – Горький: ГПИ, 1984. С.4-13.
19. Песчанский, И.С. Ледоведение и ледотехника [Текст] / И.С. Песчанский. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 461 с.
20. Sebin, A.S. The New Areas of the Ice Cover Modeling Using the Composite Model Ice «GP-ice» » / A.S. Sebin, Y.A. Dvoichenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. Т. 1079. №. 7. С. 072017.