

УДК 629.124

В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, Ю.А. Двойченко,  
В.В. Князьков, А.С. Себин, П.Л. Спехов  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА  
ПРИ ИСПЫТАНИЯХ СУДОВ

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

В последнее время активизировалась деятельность человека в арктических районах. Несмотря на большое число теоретических и экспериментальных работ, ряд вопросов, связанных с разрушением ледяного покрова для создания судоходного канала, остается недостаточно исследованным. Многие проблемы, связанные со льдом, были решены и решаются в лабораторных условиях, и доля лабораторных исследований постоянно увеличивается. Это связано с тем, что лабораторное оборудование все более усложняется, методика проведения экспериментов совершенствуется, а условия экспериментов поддаются более точному контролю. Для моделирования взаимодействия корпуса судна ледового плавания со льдом необходимо разработать физическую модель этого процесса. Результат в наибольшей степени зависит от качества лабораторного льда. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований разрушения естественного ледяного покрова поперечной нагрузкой в лабораторных условиях.

**Ключевые слова:** ледяной покров, ледовый бассейн, разрушение льда, моделирование композитного льда, испытания моделей судов.

Экспериментальные исследования ледовых качеств судов на моделях являются достаточно эффективными и широко используются в процессе проектирования судов ледового плавания в силу сложности достоверного физического и математического описания процесса взаимодействия судов со льдом. В ледовых бассейнах проводятся модельные испытания в сплошных, битых, торосистых льдах, моделируется работа буровых установок и мостовых опор в этих условиях. Исследуются также устройства и системы, повышающие эффективность использования ледоколов [1].

При моделировании, когда натуральный и модельный лед являются упругими телами, толщина, предел прочности и модуль упругости связаны соотношением:

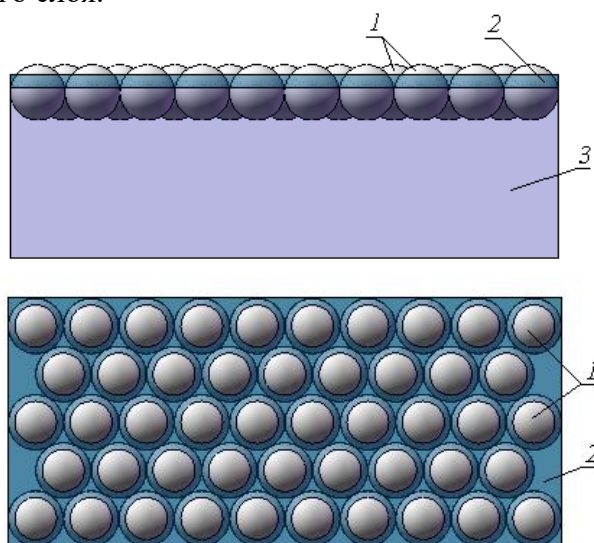
$$\frac{h_{\text{н}}}{h_{\text{м}}} = \frac{E_{\text{н}}}{E_{\text{м}}} = \frac{\sigma_{\text{н}}}{\sigma_{\text{м}}} = \lambda, \quad (1)$$

а коэффициент Пуассона и плотность должны быть равны  $\mu_{\text{н}} = \mu_{\text{м}}$ ,  $\rho_{\text{н}} = \rho_{\text{м}}$ , где индекс «н» относится к натуре, а «м» – к модели;  $\lambda$  – геометрический масштаб. Для величин, имеющих одинаковую размерность, например, для модуля упругости  $E$  и предела прочности на изгиб  $\sigma_{\text{н}}$ , должно выполняться условие  $E/\sigma_{\text{н}} = \text{idem}$ . Часто, особенно при больших масштабах, выполнить это условие не удастся. Так, по данным работы [2],  $(E/\sigma_{\text{н}})_{\text{н}} = 3000 \div 5000$ ,  $(E/\sigma_{\text{н}})_{\text{м}} = 300 \div 500$ . Лед в подобных модельных испытаниях проявляет в большей степени пластические, чем упругие свойства. К искажению геометрических размеров в распределении трещин и обломков льда приводит невыполнение условий подобия в отношении модуля упругости  $E$ . Кроме того, величина  $E$  влияет на энергию разрушения, которая пропорциональна  $1/\sqrt{E}$ . В связи с этим идет не только совершенствование методик проведения испытаний, но и поиск новых моделей льда. При этом стремятся, как правило, получить материал с заранее заданными свойствами, которые определяют с помощью теории подобия.

В результате анализа результатов натуральных исследований физико-механических характеристик ледяного покрова было установлено, что работа разрушения ледяного покрова максимально полно описывает поведение льда под нагрузкой. Возможно прямое измерение

работы в натурном и модельном экспериментах, и работа разрушения льда не подвержена масштабному эффекту. Это означает, что работа разрушения отвечает требованиям, предъявляемым к базовой характеристике льда при моделировании, и может быть принята в качестве этой базовой характеристики [3]. На принципиальную возможность моделирования льда по работе разрушения указывал Л.М. Ногид [4]. Практические работы в этом направлении проводятся в открытом ледовом бассейне Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева [5].

Одним из вариантов новой модели льда, представляющей интерес для практических целей, является слой гранул полиэтилена высокого давления (granular polyethylene ice – GP-ice), равномерно распределенных по поверхности воды и замороженных на часть своего диаметра (рис. 1). Изменение упругих и прочностных свойств льда достигается изменением толщины замороженного слоя.



**Рис. 1. Композитная модель ледяного покрова:**

1 – гранулы полиэтилена; 2 – естественный пресноводный лед; 3 – вода.

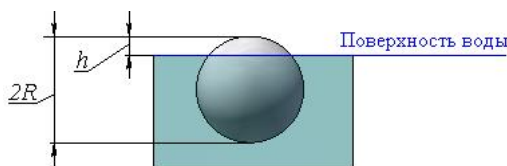
Положение гранулы правильной формы относительно поверхности воды (рис. 2) легко определяется с использованием известных соотношений для шара и уравнения плавучести:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 - \text{объем шара;} \quad (2)$$

$$V_{\text{шс}} = \pi h^2 \left(R - \frac{h}{3}\right) - \text{объем шарового сегмента,} \quad (3)$$

где  $h$  – высота шарового сегмента;

$R$  – радиус шара.



**Рис. 2. Свободное положение гранулы полиэтилена в воде**

Тогда, с учетом выполнения условия:

$$\left[\frac{4}{3}\pi R^3 - \pi h^2\left(R - \frac{h}{3}\right)\right]\rho_B = \frac{4}{3}\pi R^3\rho_{II}, \quad (4)$$

уравнение для определения высоты шарового сегмента гранулы полиэтилена, возвышающегося над водой, будет иметь вид:

$$h^3 - 3Rh^2 + 4R^3\left(1 - \frac{\rho_{II}}{\rho_B}\right) = 0, \quad (5)$$

где  $\rho_{II}$  и  $\rho_B$  – плотность полиэтилена и воды соответственно. Для  $\rho_{II}=0,92$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_B=1,0$  г/см<sup>3</sup> и при диаметре гранул 20 мм, например, над водой будет находиться 3,5 мм.

Решение изгиба пластины, плавающей на поверхности жидкости и нагруженной в центре [6], позволяет экспериментально определить модуль упругости ледяного покрова:

$$w = \frac{P}{4\sqrt{kD}} ReH_0^{(1)}(\sqrt{i}x), \quad (6)$$

где  $ReH_0^{(1)}(\sqrt{i}x)$  – вещественная часть цилиндрической функции Ганкеля нулевого порядка;

$D = \frac{Eh_l^3}{12(1-\mu^2)}$  – цилиндрическая жесткость;  $k = \rho_B g$  – модуль основания (коэффициент жесткости упругого основания);  $x = \alpha r$ ;  $\alpha = \sqrt[4]{\frac{k}{D}}$  – характеристика ледяного покрова;  $1/\alpha$  –

характерный линейный размер.

Данное решение принадлежит Герцу для стрелки прогиба под нагрузкой:

$$w = \frac{P}{8\sqrt{kD}}. \quad (7)$$

Радиус «чаши прогибов» (область вокруг нагрузки, ограниченная нулевым прогибом) для сосредоточенной нагрузки (рис.3).

$$r_{II} \cong \frac{\pi}{2\alpha} \quad (8)$$

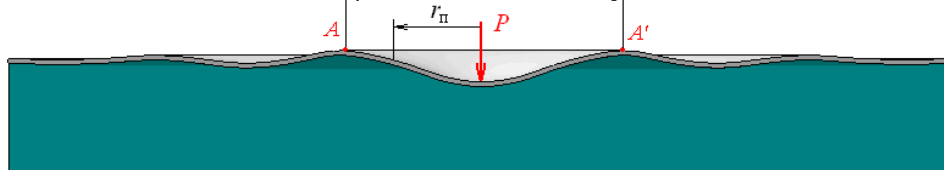


Рис. 3. Определение границ расчетной области

Радиус «чаши прогибов» определяет размеры ледяной пластины в плане и накладывает ограничение на ее толщину, т.е., когда пластину можно считать «бесконечной», а стенки бассейна не будут оказывать влияние на деформирование ледяного покрова при проведении модельных опытов. Принимая это во внимание, можно считать, что стенки бассейна не будут оказывать влияние на результаты опытов, если выполняется условие:

$$2r_0 \leq d \quad (9)$$

где  $d$  – диаметр бассейна (точки  $A$  и  $A'$  определяют максимально допустимую толщину, см. рис. 3). Например, для опытов по разрушению ледяных пластин толщиной 3,0 см и менее, вполне достаточно иметь бассейн диаметром 5,0 м.

Опыты по пролому сплошного льда, который намораживался естественным образом, проводились в круглом бассейне диаметром 4,4 м и высотой 0,8 м. Нагрузка прикладывалась в центре ледяной пластины. Для всех опытов были получены диаграммы деформирования ледяного покрова  $P = f(w)$ , т.е. зависимость усилия от прогиба. Диаграммы, одна из которых приведена на рис. 4, однотипны и имеют восходящую и нисходящую ветви. В количественном отношении диаграммы характеризуются усилием, при котором образуются первые трещины  $P_1$ , максимальным усилием  $P_p$  и прогибом при этом усилие  $w_p$ , а также прогибом, при котором исчерпывается несущая способность ледяного покрова  $w_R$ . Также к числу параметров, характеризующих процесс разрушения, относится величина работы, затрачиваемая на образование первых радиальных трещин  $A_1$ , на деформацию льда до максимальной нагрузки  $A_p$  и полная работа разрушения ледяного покрова  $A_R$ . Данные виды работ представляют собой площади соответствующих участков диаграмм. Результаты опытов по пролому приведены в табл. 1.

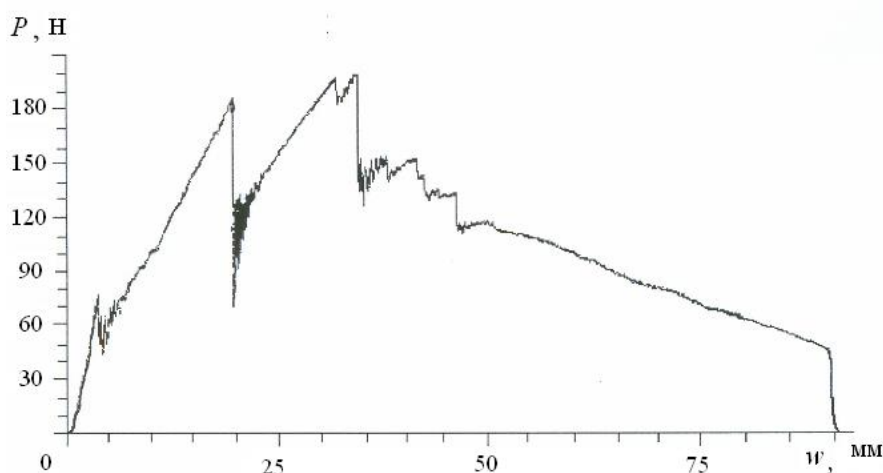


Рис. 4. Диаграмма разрушения ледяного покрова ( $h_{л}=10$  мм)

Таблица 1.

Результаты опытов по пролому ледяных пластин

$h_{л}$ , м	$P_1$ , кН	$P_p$ , кН	$w_{p1}$ , м	$w_R$ , м	$A_1$ , Дж	$A_2$ , Дж	$A_R$ , Дж	$A_1/A_R$	$A_2/A_R$	Примечание
0,030	0,85	3,18	0,026	0,085	1,35	78,4	203,0	0,006	0,39	$t = -20$ °С
0,010	0,08	0,20	0,029	0,155	0,15	1,8	10,8	0,014	0,17	$t = -17$ °С
0,042	1,22	3,52	0,019	0,056	1,49	7,0	194,1	0,008	0,36	$t = -16$ °С
0,032	1,11	2,75	0,012	0,188	1,55	19,9	175,5	0,009	0,11	$t = -10$ °С
0,042	1,38	7,20	0,035	0,044	3,72	21,5	263,1	0,014	0,08	$t = -14$ °С
0,012	0,09	0,34	0,023	0,135	0,09	4,7	22,3	0,004	0,21	$t = -8$ °С,
0,021	0,19	1,06	0,017	0,155	0,14	11,5	64,1	0,002	0,18	$t = -11$ °С,
0,016	0,12	0,49	0,019	0,128	0,24	5,1	27,6	0,009	0,18	$t = -18$ °С
0,023	0,24	0,90	0,020	0,160	0,24	11,5	49,9	0,005	0,23	$t = -22$ °С
0,023	0,30	1,70	0,021	0,056	0,14	10,2	88,2	0,002	0,11	$t = -4$ °С
0,011	0,06	0,24	0,023	0,101	–	2,05	10,0	–	0,21	$t = 0$ °С

Продолжение таблицы 1.

0,007	0,05	0,13	0,015	0,035	0,04	0,88	3,46	0,012	0,25	$t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$
0,005	0,03	0,07	0,010	0,018	0,01	0,35	0,69	0,009	0,50	$t = -2\text{ }^{\circ}\text{C}$
0,025	0,54	2,18	0,026	0,026	0,68	12,4	42,5	0,016	0,29	$t = -3\text{ }^{\circ}\text{C}$

На рис. 5. показана зависимость разрушающей нагрузки от толщины льда. Там же приведена кривая, соответствующая расчетной зависимости [7]:

$$P_p = k_p \beta h^2, \quad (10)$$

где  $\beta = (1 + 1,35\alpha\sqrt{S})$  – безразмерный коэффициент, учитывающий площадь распределения нагрузки  $S$ ;  $k_p = 1,9 \cdot 10^6$  Па.

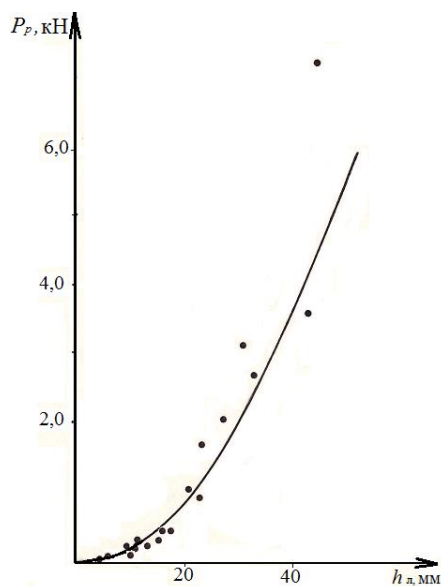


Рис. 5. Зависимость разрушающей нагрузки от толщины льда

Зависимости для  $w_p$  и  $w_R$  приведены на рис. 6. Их можно аппроксимировать следующим образом:

$$w = k_w \sqrt{h}, \quad (11)$$

где  $k_w$  – размерный эмпирический коэффициент. Для определения  $w_p$  можно принимать значение  $k_w = 0,15 \text{ м}^{0,5}$ , а для определения  $w_R$   $k_w = 1,04 \text{ м}^{0,5}$ .

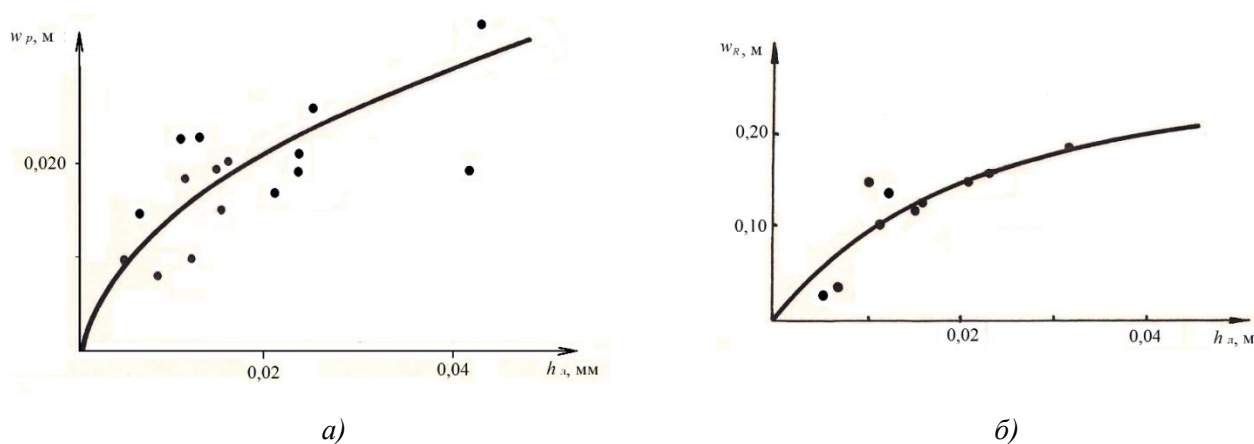


Рис. 6. Зависимость прогибов от толщины льда:  
 а – прогиб при максимальном усилии; б – максимальный прогиб

Эксперименты позволили выявить и то, что отношение работы, необходимой для образования первой кольцевой трещины  $A_2$ , момент возникновения которой обычно соответствовал максимальной нагрузке, к полной работе, увеличивается с ростом толщины льда (рис.7). Это свидетельствует, что критическая часть диаграммы более развита у более тонкого льда.

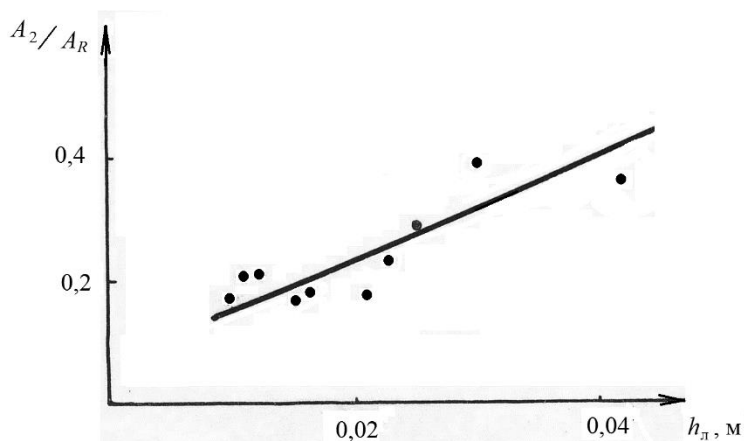


Рис. 7. Зависимость относительной работы разрушения от толщины льда

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00820.

#### Библиографический список

1. Ионов, Б.П. Проектирование ледоколов [Текст] / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов, В.А. Зуев. – СПб.: Судостроение, 2013. – 512 с.
2. Edwards, R. Y. Modeling the interaction between ice and ships // Physics and mechanics of ice (Symposium, Copenhagen, August 6-10, 1979). N.-Y., 1980, p. 217-234.
3. Ионов, Б.П. Ледовая ходкость судов [Текст] / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.
4. Каштелян, В.И. Сопротивление льда движению судна [Текст] / В.И. Каштелян, И.И. Позняк, А.Я. Рывлин. – Л.: Судостроение, 1968. – 238 с.
5. Князьков, В.В. Экспериментальное определение основных характеристик разрушения ледяного покрова [Текст] / В.В. Князьков // Морской вестник. № 4 (28), 2008. С. 106-109
6. Папкович, П.Ф. Труды по строительной механике корабля: в 4 тт. Т. 3. [Текст] / П.Ф. Папкович. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 527 с.
7. Зуев, В.А. Экспериментальные исследования разрушения ледяного покрова [Текст] / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, Ю.А. Двойченко // Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: Межвуз. сб. – Горький, Изд-во ГПИ, 1984. С. 4-13.