

УДК 629.124

**А.С. Себин, Ю.А. Двойченко**  
**ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ**  
**КРИТЕРИЯ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА, ПОЛУЧЕННОГО**  
**ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ ПРОЛОМЕ**

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

В известных методах моделирования ледяного покрова за условие пролома принято считать достижение величиной нормальных напряжений предела прочности льда на изгиб. Соответственно, в роли критерия подобия ледяного покрова используют отношение предела прочности льда на изгиб к модулю упругости. Вместе с тем, реальный процесс разрушения ледяного покрова связан не с изгибом, а со сложным напряжённым состоянием. Прочностная характеристика, получаемая в процессе разрушения, оказывается близкой к реальному процессу разрушению льда. Существующие данные и результаты опытов показывают стабильность такой характеристики, что позволяет использовать её при разработке новой методики моделирования льда.

**Ключевые слова:** моделирование ледяного покрова, изгибная прочность льда, ледовый опытовый бассейн.

Первые опыты по моделированию ледяного покрова в нашей стране проводились Л.М. Ногидом [1] в 1939-41 гг. В качестве материала модели льда была выбрана смесь парафина саломаса с керосином [1]. Такой модельный лёд хорошо удовлетворял выбранным условиям моделирования (отношение предела прочности на изгиб к модулю Юнга). Однако, при проведении экспериментов обнаружилось, что выбранный для модели льда материал обладает высокими значениями коэффициента трения по корпусу модели судна. Следующим этапом в развитии технологии моделирования ледяного покрова стала предложенная В.В. Лавровым модель, которая основывалась на замораживании подсолённой воды (т.н. *NaCl-ice*), что понижало прочность и модуль упругости модельного льда, приводя его в соответствие с натурным. Отталкиваясь от этой модели, работники ААНИИ создали первый в мире ледовый опытовый бассейн [1]. Столь большие успехи советских учёных в моделировании льда и ледотехнике привели к появлению ледовых опытовых бассейнов даже в странах с незамерзающими морями.

Создание этих бассейнов дало толчок появлению и развитию новых школ ледотехники и ледового моделирования, что приводило к возникновению новых способов моделирования. Однако, все они, основываясь на подходе, разработанным В.В. Лавровым, имели целый ряд недостатков, главным из которых была чрезмерная пластичность модельного льда, фиксирующийся как чрезмерный прогиб перед разрушением. Все эти несоответствия получили название «масштабный эффект» и послужили отправной точкой для поиска новых методов моделирования ледового покрова. Методы, получившие наибольшее распространение, приведены в табл. 1 и подробно изложены в [1].

Для проверки соответствия намороженного льда натурному в этих моделях (за исключением №6 и №7) был выбран опыт облома клавиши. Целью этого эксперимента служит получение модуля Юнга натурального льда  $E$  и предельных нормальных напряжений  $\sigma_u$ , соответствующих изгибному разрушению как  $\frac{E}{\sigma_u} = \lambda$ , где  $\lambda$  – масштаб моделирования, что

являлось доказательством адекватности модели натуре. Однако, накопленный к настоящему времени объём данных, не может подтвердить правильность такого подхода. Опытные данные многих исследователей [2, 3], занимающихся моделированием ледяного покрова, показывают, что разрушение ледяного покрова – процесс более сложный, чем достижение величиной нормальных изгибных напряжений в плавающей ледяной пластине предельных

значений. Влияние изгибной прочности на процесс разрушения льда вертикальной нагрузкой заметно лишь на начальных этапах, при этом общий её вклад в итоговое сопротивление льда движению судна является незначительным.

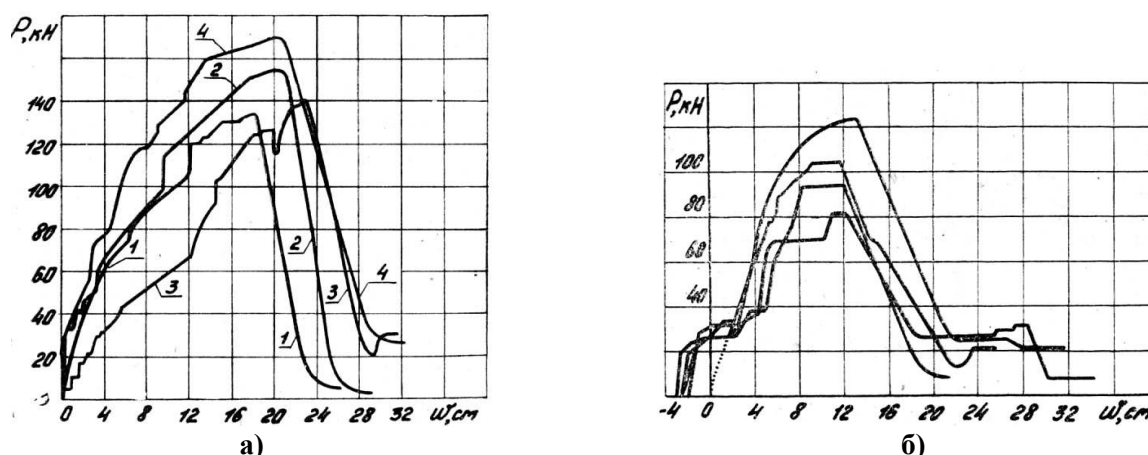
**Таблица 1**  
**Методы моделирования ледяного покрова**

№	Наименование метода, модели льда	Основные особенности получения моделированного льда	Авторы, место применения, год появления метода
1	Метод ААНИИ, лед Лаврова (NaCl-ice)	Замораживание соленой (~ 2%) воды	В.В. Лавров , Ю.А. Шиманский, Л.М. Ногид, И.И. Позняк, В.И. Каштелян, С-Петербург, 1955 г.
2	Метод Шварца (NaCl-ice)	Замораживание соленой (~ 2%) воды с «растеплением» верхнего слоя	И. Шварц (NSVA), Гамбург, Э. Энквист, WARC, Финляндия , 1975г.
3	Карбамидная модель льда Г.В. Тимко (Urea-ice)	Замораживание раствора карбамида (~ 1.3%) в воде с «растеплением» верхнего слоя	Г.В. Тимко, NRC, Канада, 1985 г.
4	Трехкомпонентная модель льда (EG/AD/S-ice)	Замораживание слоев этиленгликоля, пропилен-гликоля, сахарозы	Г. В. Тимко, NRC, Канада 1985 г.
5	Лабораторный лед Энквиста – Мякинена (FG-ice), и Нортала – Хойкканен (FGX-ice)	Сложный процесс замораживания, распыления и «растепления» смеси компонентов	Э. Энквист, С. Мякинен, (MARC), Финляндия 1981 г.
6	Метод Ионова; Лабораторный лед Зуева, Грамузова, Белякова (GP-ice)	Замораживание в естественном льду полиэтиленовых гранул	В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, В.Б. Беляков, Б.П. Ионов, НГТУ, Нижний Новгород, 1982 г.
7	Метод Зуева-Грамузова	Замораживание тонкого слоя пресноводного льда в условиях естественного холода	В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, НГТУ, Нижний Новгород, 1977

На завершающем этапе пролома ледового поля возникают усилия распора между ледяными блоками, образованными трещинами во льду на предыдущих этапах. Окончательное разрушение льда происходит из-за потери прочности при сложнопнапряжённом состоянии [3]. Однако, несмотря на значительный объём накопленных экспериментальных данных, этот упрощённый критерий адекватности модели, основанный на сохранении отношения предела прочности к модулю упругости, продолжает использоваться, что связано с отсутствием исследований по границам применимости этого метода. Это приводит к появлению больших погрешностей при проведении экспериментов и, как следствие, введению поправочных коэффициентов для обеспечения согласованности результатов модельных и натуральных экспериментов.

Согласно методу №6 (табл. 1) модель ледового покрова считается подобной натуре, если соблюдается критерий подобия энергии разрушения при полном проломе ледяной пластины центральным сосредоточенным усилием. Если исследуется прокладка канала в ледяном покрове, то применяется схема нагружения полубесконечной пластины [2]. Такой подход к моделированию ледового поля является более обоснованным и позволяет избежать погрешностей и неточностей, неизбежно присутствующих в методах №№ 1-5. График зависимости силы от прогиба натурной ледяной пластины под нагрузкой приведён на рис. 1. Кривая имеет ярко выраженный ступенчатый характер. Каждая ступень графика соответствует определённой фазе разрушения ледяного покрова. Первая ступень (рис. 1, а,

кривая 4) означает развитие радиальных трещин во льду, последующие ступени – появление кольцевых трещин.



**Рис. 1. Характерные диаграммы разрушения натурального ледяного покрова**  
**а – центральный пролом: кривая 4 – для  $h = 24,5$  см, остальные для  $h = 22 \div 24$  см,**  
**площадь штампа  $5,3 \text{ м}^2$ ; б – прокладка канала во льду  $24,5$  см штампом площадью  $5,3 \text{ м}^2$  [1]**

Большой интерес представляет взаимосвязь максимального усилия на диаграмме разрушения и толщины льда  $h$ , которую можно выразить простым соотношением:

$$P_{\max} = k_p h^2, \quad (1)$$

где  $k_p$  – эмпирический коэффициент.

Впервые значение этого коэффициента определили В. Ключарев и С. Изюмов [4] во время Великой отечественной войны при проведении опытов по центральному пролому ледяного покрова Ладожского озера для создания «Дороги жизни». Они выяснили, что максимальная нагрузка на лёд составляет, кГс:  $P = 20h^2$  (здесь  $h$  в см). Это же значение в 1984 г. было получено Е.М. Грамузовым и Ю.А. Двойченко при проведении опытов на натурном ледяном покрове. Результаты этих исследований приведены на рис. 1, где величина коэффициента составила в единицах СИ  $k_p = 1,96 \text{ МПа}$ . Относительная погрешность при проведении экспериментов составила  $\pm 10\%$  при центральном проломе и  $\pm 20\%$  при прокладке канала. Необходимо отметить, что значение этого коэффициента никак не зависит от температуры и структуры льда, а также от условий проведения экспериментов.

Ещё одной важной характеристикой диаграммы разрушения является значение прогиба под максимальной за время проведения эксперимента действующей силой, т.е. под разрушающей нагрузкой. Зависимость величины этого параметра от толщины ледяного покрова впервые было получено в 1960 г. Д. Ф. Панфиловым [5]:

$$w_{\max} = 2,2\sqrt{h}, \quad (2)$$

где  $w$  и  $h$  записаны в см.

Физическую природы этой взаимосвязи не удалось выяснить до сих пор, однако коэффициент прогиба при разрушении ледяного поля  $k_w = \frac{w_{\max}}{\sqrt{h}} = 2,2$  был также подтверждён в опытах [2], результаты которых приведены на рис. 1. Его величина обладает меньшей стабильностью ( $\pm 20\%$ ), особенно при прокладке канала.

Тем не менее, критерий подобия энергий разрушения, представленный в методе №6 [8], не нашёл применения в мировой практике ледового моделирования. Причиной этому служит устоявшееся представление о механике разрушения ледяного покрова, сформулированное В.И. Каштеляном [6], согласно которому момент разрушения льда

наступает при достижении величины нормальных напряжений предела прочности на изгиб. В НГТУ методика №6 не получила широкого распространения из-за технологических сложностей организации эксперимента, связанных с трудностями равномерного засеивания поверхности бассейна полиэтиленовыми гранулами в условиях естественного холода. С данной точки зрения, для бассейнов с естественным намораживанием приемлемым оказался метод №7. Суть его заключается в подборе такой толщины модельного ледяного покрова, чтобы обеспечить подобие сил ломки льда как составляющей ледового сопротивления модели судна. Для учёта остальных же составляющих сопротивления, обусловленных влиянием обломков льда, динамикой движения и пр. разработаны специальные приёмы.

С целью дальнейших разработок методик моделирования ледяного покрова как продолжения №6 и №7 в НГТУ им. Р.Е. Алексеева была создана низкотемпературная лаборатория с малым опытовым бассейном. Первые результаты, опубликованные в работе [9], оказались очень близки к значениям коэффициентов в формулах (1) и (2), при этом толщина льда составляла примерно  $1,8 \pm 3$  мм, форма диаграмм разрушения повторяла форму натуральных диаграмм.

Применение искусственного намораживания льда в термокамере позволяет проводить эксперименты в круглогодичном режиме, а также анализ различных моделей ледяного покрова с позиций подобия энергий разрушения модели и природы. Данные, приведенные в настоящей работе, следует рассматривать как постановку исследовательских задач, для решения которых появился новый инструмент, позволяющий упростить и ускорить опыты по разрушению модельного ледяного покрова с целью оценки известных методов моделирования и поиска новых способов получения модельного льда, обеспечивающих адекватность моделирования.

### *Библиографический список*

1. Ионов, Б.П. Ледовая ходкость судов [Текст] / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.
2. 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. / ГПИ. – Горький, 1984. С. 4-19.
3. Двойченко, Ю.А. Деформация и пролом ледяного поля [Текст] // Теория и прочность ледокольного корабля: Межвуз. сб. / ГПИ. – Горький, 1980. Вып 21. С. 38-44.
4. Ключарев, В. Определение грузоподъемности ледяных переправ [Текст] / В. Ключарев, С. Изюмов // Военно-инженерный журнал. 1943. № 2; 3. С. 30-34.
5. Панфилов, Д.Ф. Экспериментальные исследования грузоподъемности ледяного покрова [Текст] // Известия ВНИИГ. – М.: Госэнергоиздат, 1960. Т. 65. С.101-116.
6. Каштелян, В.И. Приближенное определение усилий, разрушающих ледяной покров [Текст] // Проблемы Арктики и Антарктики. 1960. № 5.
7. К вопросу о моделировании движения судов в сплошном ледяном поле [Текст] / В. А. Зуев, М. Е. Рабинович, Е.М. Грамузов, Ю.А. Двойченко // Теория и прочность ледокольного корабля. – Горьковский политехнический институт, 1978. – С. 22-25.
8. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, С. Войтковский-Кригер. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 1963. – 635 с.
9. Сяолун, Б. Экспериментальные исследования разрушения ледяного покрова в малом ледовом бассейне [Текст] / Б. Сяолун, К.А. Бакулин, А.И. Водяницкий, Е.М. Грамузов, Ю.А. Двойченко // Полярная механика. 2016. С. 268.