

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 624.124.791

В.А. Зуев, Е.М. Грамузов

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЛЕДОВОЙ СРЕДЫ ПРИ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ СУДОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы создания новой физической модели ледяного покрова для проведения модельных исследований взаимодействия судов со льдом.

*Ключевые слова:* лед, модель ледяного поля, ледовое сопротивление, пересчет результатов на натуру

### Введение

Сложность процессов взаимодействия судов и сооружений со льдом не всегда позволяет составить достоверную математическую модель такого взаимодействия. Поэтому получение данных о ледовых качествах судов еще при проектировании приводит к необходимости обращаться к экспериментальным методам исследования на моделях. Сейчас в мире насчитывается более 15 работающих ледовых бассейнов, в которых проводятся испытания судов в сплошных, битых, торосистых льдах, моделируется работа буровых установок и мостовых опор в ледовых условиях с целью прогнозирования силового воздействия льда на суда и морские сооружения, исследуется работа различных устройств и систем, повышающих эффективность проведения операций во льдах.

Основной проблемой моделирования ледового сопротивления является создание физической модели льда, адекватно отображающей его взаимодействие с судами и сооружениями в натуральных условиях.

Теоретические обоснования моделирования движения судов во льдах, разработаны в середине прошлого века Ю.А. Шиманским и Л. М. Ногидом (г. Санкт – Петербург) [1, 2]. Согласно этой теории, основными критериями подобия являются:

$$\rho_H^L = \rho_M^L; \rho_H^B = \rho_M^B; \mu_H = \mu_M; f_H = f_M; E_M = \frac{E_H}{\lambda};$$

$$\sigma_M = \frac{\sigma_H}{\lambda} \frac{E}{\sigma} = idem; Fr = idem; Re = idem; Ch = idem.$$
(1)

где  $\rho_H^L, \rho_M^L$  - плотность натурального и модельного льда;  $\rho_H^B, \rho_M^B$  - плотность воды натуре и модели;  $E, \mu$  - модуль упругости и коэффициент Пуассона для льда;  $\sigma_M = \sigma_H$  - разрушающие лед нормальные напряжения;  $f_H, f_M$  - коэффициенты трения льда о корпус для натуре и модели;  $\lambda$  - геометрический масштаб моделирования;  $Fr = v/\sqrt{gL}$  - число Фруда;  $Re = vL/\eta$  - число Рейнольдса;  $Ch = \rho_x v^2/E$  - число Коши;  $\eta_H, \eta_M$  - скорости движения натуре и модели;  $v_H, v_M$  - кинематический коэффициент вязкости жидкости натуре и модели.

К этим критериям в последние годы стали добавлять критерий А.С. Аткинса [3], учитывающий трещинообразование в ледяном покрове.

$$Yn = Ch^2 \left( \frac{El}{k} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $Yn$  - ледовое число;  $l$  - характерная длина дефектов кристаллической решетки;  $k$  - вязкость разрушения.

Полное сопротивление среды при движении судна во льдах  $R$  обычно представляется в виде:

$$R = R_p + R_{обл} + R_v, \quad (3)$$

где  $R_p$  - сопротивление разрушения льда и трения его о корпус;  $R_{обл}$  - сопротивление обломков;  $R_v$  - сопротивление воды.

Различная природа сил, составляющих ледовое сопротивление, подчиняющихся разным законам, требует при моделировании одновременного выполнения перечисленных критериев подобия (формула (1)). Этого, как правило, достичь не удастся, и обычно речь идет о частичном подобии.

В этой статье приводятся новые подходы к моделированию воздействия льда на суда и морские сооружения.

### Моделирование разрушения льда

Казалось бы, материалом для имитации ледовых условий мог бы быть тонкий естественный лед, но его повышенная прочность по сравнению с требуемой теорией моделирования при сохранении геометрического подобия по толщине ( $h_M = h_H / \lambda$ ) делает его мало пригодным для испытаний. В соответствии с условиями (1) необходимо, чтобы прочность и упругость модели льда были в масштаб раз меньше, чем у природы при сохранении постоянного отношения  $E/\sigma$ . Но при таком подходе лед становится более пластичным, чем упругим телом, что при его разрушении приводит к несоответствию геометрии образования трещин в натуральных условиях и, как следствие, к нарушению динамического подобия.

Поэтому во всем мире ведутся поиски новых моделей льда как в отношении материала, его имитирующего, так и в отношении управления его характеристиками.

Для определения сопротивления разрушения льда при движении модели предлагается использовать тонкий естественный лед. Этот лед имеет повышенную прочность [5] и, очевидно, поэтому получило распространенное мнение о невозможности его применения. Однако при использовании такой модели льда компенсировать повышенную прочность ледяного покрова при разрушении изгибом можно меньшей толщиной, чем требуемая в формуле (1).

Необходимо отметить, что моделирование сопротивления от разрушения ледяного покрова при движении модели в тонкой ледяной пластине вносит погрешности в определение инерционной и скоростной составляющих полного сопротивления, зависящих от толщины льда.

Поэтому в статье речь идет о раздельном моделировании составляющих полного сопротивления льда (от разрушения и от движения в обломках), которые не моделируются одновременно и подчиняются разным законам.

Такой подход к использованию в качестве модельной среды лабораторного пресноводного льда был применен Д.П. Вэнсом [6] и в Гамбургском опытовом бассейне О. Гримом, причем пересчет толщины льда велся по величине  $\lambda^{1.5}$ , а сил по  $\lambda^3$ .

Как отмечает автор работы [6], этот метод не нашел большого числа последователей из-за «отсутствия в бассейнах соответствующего оборудования, трудностей с контролем роста льда в режиме намерзания».

Однако этот метод с введением дополнительных критериев пересчета результатов на натуру успешно применяется в ледовом бассейне Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, расположенного на открытом воздухе, используемого в холодное время года. Последнее приводит к существенному снижению стоимости и трудоемкости проведения испытаний.

Для определения дополнительных критериев подобия для проведения модельных испытаний в тонком естественном льду с сохранением геометрии образования обломков запишем уравнение напряженно – деформированного состояния (НДС) ледяного покрова под действием поперечной нагрузки.

$$D\nabla^4 w + \rho_B g w = 0. \tag{4}$$

где  $w$  - прогиб льда;  $D = Eh^3 / (12(1 - \mu^2))$  - цилиндрическая жесткость ледяной пластины.

В формуле (4) предполагается, что ледокол движется в предельных льдах постоянной толщины с малой скоростью. Ледяной покров принят как упругая изотропная пластина постоянной толщины.

Для определения условий подобия при моделировании приведем формулу (4) к безразмерному виду.

$$D / (\rho_B g L^4) w + w = 0. \tag{5}$$

Коэффициенты при безразмерных членах уравнения (5) являются условиями подобия при определении НДС ледяной пластины, т.е.:

$$D / (\rho_B g L^4) = idem. \tag{6}$$

Откуда  $\frac{E_H h_H^3 L_M^4}{E_M h_M^3 L_H^4} = \frac{\rho_B^H}{\rho_B^M}$ . Обозначим  $\lambda_h = \frac{h_H}{h_M}$ ;  $\lambda_E = \frac{E_H}{E_M}$ ;  $\lambda_\rho = \frac{\rho_B^H}{\rho_B^M}$ . Получим для

масштаба толщины льда:

$$\frac{h_H}{h_M} = \lambda_h = \lambda^{4/3} \lambda_\rho^{1/3} \lambda_E^{-1/3}. \tag{7}$$

Данных о модуле упругости тонкого модельного льда мало, поэтому, при недостаточной информации об этом, целесообразно перед испытаниями проводить опыты по определению  $E_M$ .

Следует отметить, что анализ несущей способности, основанный на теории изгиба упругих пластин, позволяет получить лишь НДС ледяной пластины. Комплексные исследования сопротивления льда при движении ледоколов зависят не только от критических напряжений при изгибе, но и от прочности льда при срезе, смятии и др., возникающих одновременно.

Однако в работе [8] показано, что увеличение одних прочностных характеристик приводит к уменьшению других и наоборот. При этом, сопротивление льда при его разрушении ледоколом остается практически постоянным при его неизменной толщине [8]. Наши исследования [4] показали, что наиболее полной характеристикой является работа на полное разрушение (пролом) льда, а не только на образование магистральных трещин, от которых несущая способность ледяного покрова чаще всего сохраняется.

Поэтому целесообразно для определения сопротивления льда при его разрушении использовать энергетический подход, характеристикой которого является работа, затрачиваемая ледоколом на разрушение льда.

$$A_p = \int_0^{w_p} P(w) dw, \tag{8}$$

где  $P(w)$  - вертикальная сила, приложенная к ледяной пластине,  $w_p$  – прогиб, при котором происходит полное разрушение льда.

В работах [4, 8] и других показано, что проломная нагрузка хорошо аппроксимируется формулой:

$$P = kh^2, \quad (9)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Прогиб ледяной пластины под действием вертикальной силы может быть выражен зависимостью

$$w = k_w P / \sqrt{\rho_B g D}, \quad (10)$$

где  $k_w$  - коэффициент, зависящий от формы ледяной пластины в плане.

Используя (8), (9), (10), можно получить масштаб работы.

$$\lambda_A = \lambda_p \lambda_w = \lambda_h^{5/2} \cdot \lambda_E^{-1/2}. \quad (11)$$

Необходимо отметить, что  $A_p$  наиболее полная характеристика ледяного покрова с точки зрения разрушения его ледоколом, охватывающая в интегральном виде все этапы разрушения – от образования трещин до полного пролома.

Масштаб подобия сопротивления разрушения льда можно определить следующим образом:

$$\lambda_R = \frac{R_{pH}}{R_{pM}} = \frac{A_{pH}}{A_{pM}} \cdot \frac{l_M}{l_H} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{A_{pH}}{A_{pM}} = \lambda^3. \quad (12)$$

Формула (12) не противоречит строгой теории моделирования, но расширяет поиск модели льда.

Таким образом, составляющая сопротивления льда при движении модели ледокола, связанная с разрушением ледяного покрова, определяется при моделировании в естественном льду, замороженном при отрицательных температурах воздуха следующим образом:

- сопротивление от разрушения льда  $R_H = \lambda^3 R_M$ ;
- толщина льда

$$h_H = \lambda^{4/3} \lambda_E^{-1/3} h_M; \quad (13)$$

- скорость движения  $v_H = \lambda^{1/2} v_M$ .

Коэффициенты трения корпуса модели о лед ( $f$ ) подбираются перед испытаниями известными способами. Как показал А.Я. Рывлин [7], соленость льда не оказывает существенного влияния на коэффициенты трения, которые для морского и пресного льда практически одинаковы. Рекомендуемые МКОБ [9] значения коэффициента трения при реальных скоростях движения  $f = 0,10 \div 0,12$ .

### Моделирование битого льда

При моделировании движения судна в битом льду удается выполнить более строгие условия моделирования, связанные с критерием Фруда. Эти условия записываются следующим образом:

$$Fr = idem, \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{в}}} = idem, f = idem, s = idem, \quad (14)$$

где  $s$  – сплоченность битого льда. В этом случае

$$R_H^{обл} = \lambda^3 R_M^{обл}, h_H = \lambda h_M, v_H = \sqrt{\lambda} v_M. \quad (15)$$

Поскольку толщины льда при разрушении ледяного покрова не соответствуют толщинам при моделировании движения в обломках льда, совместное моделирование составля-

ющих сопротивления льда от разрушения и движения в обломках в этом способе не возможно. Наибольшее несоответствие сил сопротивления при моделировании возникает из-за сил плавучести и трения обломков о корпус, линейно зависящих от толщины льда. Инерционные составляющие, связанные с поворотом и раздвиганием льдин, а также с присоединенными массами воды, меньше зависят от толщины, а больше от площади льдин.

Поэтому для более строгого моделирования  $R_p$  и  $R_{обл}$  предлагается способ экспериментального разделения составляющих, требующих дополнительных испытаний в битом льду.

Эти испытания могут быть и самостоятельными при определении сопротивления в битых льдах.

Большое разнообразие ледовых условий, нестабильность характеристик битых льдов делают достаточно сложным выполнение многочисленных условий, характеризующих натурную ледовую обстановку (в том числе форму и размеры отдельных льдин, их сплоченность). Поэтому в эксперименте движение судна моделируется приближенно в некоторой условной среде с обломками льда. Условия подобия соблюдаются в отношении наиболее важных характеристик битого льда (толщины льдин, сплоченности, ширине канала, коэффициента трения льда о корпус, размеров обломков в плане, плотности).

Это дает возможность моделировать битый лед с помощью пластинок из полиэтилена высокого давления, предложенного нами ранее [4]. Пластинки могут быть квадратной или треугольной формы и одинаковых размеров, что обеспечивает повторяемость опытов. Эти опыты можно проводить в обычном (не ледовом) бассейне.

У полиэтилена высокого давления  $\rho_{л} = 0,91 - 0,92 \text{ т/м}^3$ ,  $f \approx 0,12 \div 0,15$ , что соответствует условиям (14).

### Методика и технология проведения испытаний

В бассейне намораживают лед требуемой (или близкой к ней) толщины и проводят буксировочные испытания при постоянной тяге (в бассейнах гравитационного типа).

Такие испытания при постоянной тяге проводятся для ряда толщин льда и строится диаграмма ледопроеходимости  $h = f(V)$  при  $T_e = \text{const}$ .

Испытания повторяются для ряда тяговых усилий.

На построенных диаграммах проводятся сечения для одинаковых толщин льда и строятся кривые буксировочного сопротивления для каждой толщины льда.

После каждого испытания проводятся испытания в обломках разрушенного льда при разных скоростях. Строятся кривые  $R_{обл} + R_e = f(v)$  для разных толщин льда.

Как показали наши эксперименты [4], некоторое измельчение обломков тонкого льда при повторных прогонах не приводит к существенным погрешностям, к тому же, величина этого сопротивления мала по сравнению с сопротивлением от разрушения.

Из кривых полного сопротивления вычитаются сопротивления обломков и воды. Полученные результаты сопротивления от разрушения пересчитываются по формулам (13).

Проводятся испытания модели в битом льду заданной толщины и сплоченности, имитируемом плитками полиэтилена. Результаты пересчитываются по формулам (15). Ввиду малости сопротивления воды по сравнению с сопротивлением обломков отдельно составляющую сопротивления воды не выделяют и пересчитывают вместе с обломками по критерию Фруда.

Пересчитанные на натуре силы сопротивления от разрушения льда и от сопротивления обломков льда и воды суммируются. Такой подход к пересчету результатов модельных испытаний с разделением составляющих сопротивления с применением разных законов их пересчета аналогичен и экспериментальному определению сопротивления воды с разделением его на трение и остаточное с разными методами их пересчета на натуре.

Необходимо упомянуть еще одно обстоятельство, отмеченное нами во время испытаний – это испытания моделей в битом льду в соленой и пресной воде. Испытания в

соленой воде приводят к увеличению сопротивления обломков примерно на 20%. Это важно, когда испытания проводятся в пресной воде, а эксплуатация судна в морской. Очевидно, что увеличение солености воды вызывает увеличение давления обломков льда на корпус судна и связанное с этим увеличение трения льда о корпус. Принято [1], [4], [7] и др сопротивление обломков льда при движении ледокола разделять на статическую (не зависящую от скорости) и динамическую составляющую.

Анализ показал, что соленость оказывает значительное влияние на статическую составляющую сопротивления обломков, когда  $v \rightarrow 0$  [10]. Очевидно, это связано с возрастанием давления на обломки льда и сопротивления трения. Учесть это можно введением коэффициента  $k$  в выражение статической составляющей обломков.

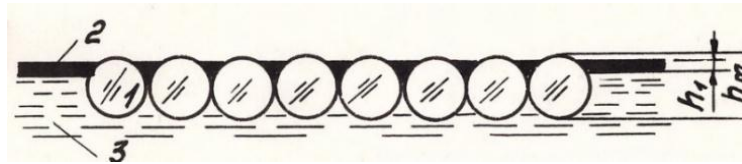
$$R_{обл}^н = k\lambda^3 R_{обл}^м, \quad k = \frac{\rho_n^в - \rho_m^л}{\rho_m^в - \rho_m^л}. \quad (16)$$

Динамическая составляющая при переходе из пресной воды в соленую увеличивается пропорционально увеличению плотности.

### Модель льда композитной конструкции

Предложенный способ моделирования взаимодействия судов и морских сооружений со льдом с разделением составляющих, хотя и позволяет быстро, достаточно надежно и с низкой стоимостью получить результаты, но он не свободен от ряда недостатков. В частности, раздельное моделирование значительно усложняет испытания, которые необходимо проводить в разных средах: моделированном тонком естественном сплошном льду и в битом льду из плиток полиэтилена. Сложно обеспечить при движении в сплошном естественном льду требуемый для натуральных условий коэффициент трения.

Поэтому предложенный способ можно усовершенствовать, не разделяя составляющие. Это можно сделать, используя модель льда композитной структуры, представленной на рис. 1.



**Рис. 1. Модель ледяного поля композитной структуры:**  
1 - гранулы полиэтилена; 2 - замёрзший слой воды; 3 - вода

Поверхность воды засыпается гранулами полиэтилена высокого давления, диаметр которых соответствует геометрическому масштабу натурального льда. При этом выполняются условия моделирования (14), (15). При отрицательных температурах на поверхности воды (между гранулами) намораживается тонкий слой ( $h_1$ ) естественного льда, характеристики которого соответствуют условиям (12), (13) в отношении толщины, прочности и упругости.

В этом случае не требуется проводить испытания в двух средах, и удается выполнить условия моделирования (как указывалось ранее условия частичного подобия).

Некоторая сложность в этих испытаниях заключается в том, что относительный объем (и следовательно масса модели) льда в виде гранул меньше при взаимодействии с моделью, чем относительная масса льда, взаимодействующая с судном. Поэтому в расчет сопротивления льда необходимо вводить коэффициент (аналогичный коэффициенту упаковки гранул, равный отношению объема гранул полиэтилена с учетом объема замороженного слоя к объему описанного вокруг них прямоугольного параллелепипеда).

В этом случае полное сопротивление, полученное при испытаниях

$$R = \kappa_1 (R_p + R_{обл}) + R_B \quad (17)$$

Пересчет на натуру проводится так:

$$R_H = \lambda^3 R_M, h_H = \lambda h_M, v_H = \sqrt{\lambda} v_M \quad (18)$$

Ввиду малости сопротивления воды при движении модели в ледовых условиях в полном балансе сил сопротивления ее отдельно можно не рассчитывать, а пересчитывать по кубу масштаба (в соответствии с законом подобия Фруда).

Как показали наши опыты, функциональная зависимость  $E^*(h)$  для композитной структуры остается с точностью до постоянной такой же, как и для естественного льда. Прочностные свойства льда соответствуют моделированию по толщине замороженного слоя  $h_M$ .

Модельный лед композитной структуры со стабильными характеристиками легко приготовить в открытых опытовых бассейнах в зимнее время, причем даже значительные колебания температуры воздуха практически не оказывают влияния на адгезионные свойства полиэтилена и влияют лишь на скорость роста льда.

К положительным эффектам новой технологии относится близость диаграммы разрушения композитного и естественного льда реальных толщин, что приводит к соответствию работ разрушения и геометрии обломков льда в натуральных и модельных условиях.

На рис. 2 в качестве примера приведена диаграмма ледопроеходимости ледокола проекта 1105, полученная пересчетом данных проведенных в ледовом бассейне НГТУ испытаниях и сравнение их с натурными данными, полученными в Нижегородской академии водного транспорта [4].

На рис. 3 приведены результаты испытаний модели ледокола R-класса в масштабе  $\lambda=40$  и сравнение с данными натурных испытаний.

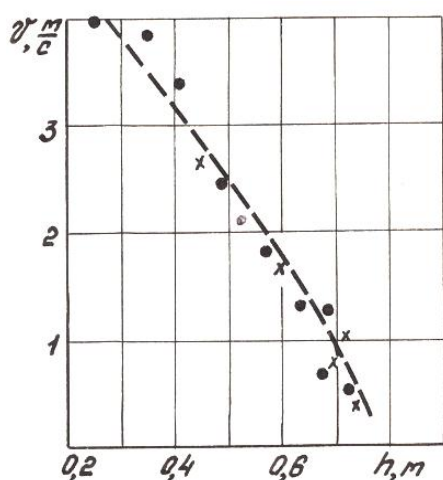


Рис. 2. Диаграмма ледопроеходимости ледокола пр. 1105:

- - - натурные испытания;
- – результаты пересчета в композитном льду;
- x – то же в тонком естественном льду

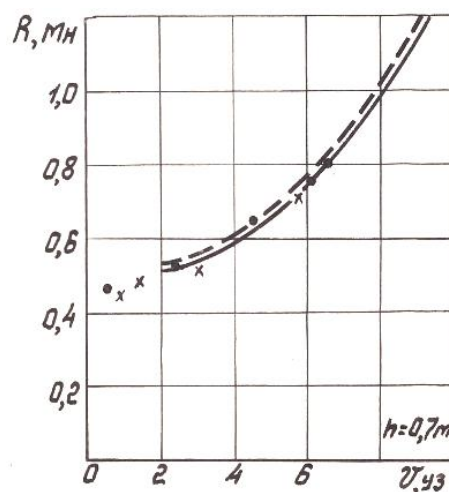


Рис. 3. Сопротивление ледокола R-класса во льду по данным натурных испытаний и по пересчету испытаний модели в бассейне НГТУ:

- – естественный лед;
- x – композитный лед)

На рис. 4 и рис. 5 показаны фрагменты испытаний.

Приведенные способы моделирования, проведения испытаний и пересчета результатов на натуре не ставят цели замены работы ледовых бассейнов с отработанными способами и приемами, но позволяют проводить недорогие и высокопроизводительные испытаний, не требующие уникального оборудования для выявления оптимального варианта.

Оптимальный вариант можно всесторонне испытать в специальных ледовых бассейнах.



**Рис. 4. Фрагмент испытаний ледокола R-класса  
в естественном льду**



**Рис. 5. Фрагмент испытаний модели  
ледокола в битом льду  
(в плитках полиэтилена)**

### Библиографический список

1. **Ногид, Л.М.** Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и в битых льдах // Труды ЛКИ. Вып. XXVIII. – Л. – С. 179–185.
2. **Шиманский, Ю.А.** Теория моделирования движения судна в сплошном ледяном поле. Современные вопросы ледоколостроения / Ю. А. Шиманский. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 89 с.
3. Atkins, A.G. Icebreaking modeling // Journal of Ship Research. Vol. 19. No1. March 1975. P. 40-43.
4. **Зуев, В. А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В. А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 206 с.
5. **Лавров, В.В.** Деформация и прочность льда / В.В. Лавров. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 206 с.
6. **Vance, G.P.** Model testing in ice // Naval Engineers Journal. 1968. – IV. – Vol. 80. – № 2. – P. 259–264.
7. **Доронин, Ю.П.** Морской лед / Ю.П. Доронин, Д. Е. Хейсин. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 318 с.
8. Kivicild et all mathematical and physical modeling of ice. Symposium of ice. Lulea Sweden. August 1978. POAC – 78. Proc. Part I. P. 379–391.
9. **Сазонов, К.Е.** Буксировочные испытания эталонной модели МКОБ в ледовом опытовом бассейне / К.Е. Сазонов, О.М. Старовойтов // Судостроительная промышленность. Сер. Проектирование судов, 1989. – Вып. 12. – С. 42–47.
10. **Семенов, Д.А.** Моделирование солёности воды и льда при модельных испытаниях судов в битых льдах // Известия калининградского государственного технического университета. – 2012. – № 25. – С. 127–134.

*Дата поступления  
в редакцию 08.11.2016*

**V. A. Zuev, E. M. Gramzow**

### **NEW APPROACHES TO MODELING OF ICE ENVIRONMENT DURING THE TESTS OF SHIP MODELS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev

Deals with creating a new physical model of the ice cover to conduct model studies of the interaction of ships with ice. Proposed methods of simulation of broken ice, a composite model of ice, the technique and technology of testing models of ships in broken ice.

*Key words:* ice model of ice fields, ice resistance, calculation of results on nature.