

УДК 629.124

В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, Д.А. Семенов

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СУДОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

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

*Ключевые слова:* ледовые условия, сопротивление, битые льды, судно, физико-механические характеристики.

Сложность процессов взаимодействия судов и сооружений со льдом далеко не всегда позволяет составить достоверную математическую модель такого взаимодействия. В то же время необходимость получения данных о ледовых качествах судов еще в процессе проектирования заставляет обращаться к экспериментальным методам исследования. Сейчас в мире насчитывается более десяти работающих ледовых бассейнов, в которых проводятся испытания судов в сплошных, битых и торосистых льдах, моделируется работа буровых установок и мостовых опор в ледовых условиях, исследуются различные устройства и системы, повышающие эффективность проведения операций во льдах.

Основной проблемой моделирования ледового сопротивления является создание физически адекватной модели льда. Теоретические основы моделирования движения судна во льдах были разработаны Ю.А. Шиманским и Л.М. Ногидом. Согласно этой теории, основными критериями подобия являются:

$$Fr=idem, Re=idem, Ch=idem, p_{л}/p_{в}=idem, f_{н}=f_{м}, \mu_{н}=\mu_{м}, \sigma/E=idem, h_{н}/h_{м}=\sigma_{н}/\sigma_{м}=\lambda,$$

где  $Fr$ ,  $Re$ ,  $Ch$  - числа Фруда, Рейнольдса и Коши;  $\rho_{л}$ ,  $\rho_{в}$  - плотности льда и воды;  $f_{н}$ ,  $f_{м}$  - коэффициенты трения природы и модели;  $h_{н}$ ,  $h_{м}$  - толщины льда природы и модели;  $\sigma$ ,  $E$  - напряжения и модуль упругости;  $\lambda$  - геометрический масштаб моделирования.

Кроме того, реологическая модель и механизм разрушения льда у модели льда должны быть одинаковыми с натурой. Дополнительный критерий с учетом трещинообразования был введен Аткинсом

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

где  $Jn$  - ледовое число;  $L$  - характерная длина дефектов в ледяном покрове;  $k$  - вязкость разрушения.

При моделировании движения в битом льду требования к материалу модели ослабляются и непосредственно вытекают из перечисленных.

Моделируя сплошной ледяной покров, стремятся получить материал с заданными механическими характеристиками, часть которых должна управляться в зависимости от масштаба модели.

Полное сопротивление среды при движении судна во льдах обычно представляют в виде

$$R = R_p + R_{обл} + R_{в}, \quad (2)$$

где  $R_p$  - сопротивление от разрушения льда;  $R_{обл}$  - сопротивление обломков;  $R_{в}$  - сопротивление воды.

Различная природа составляющих сил ледового сопротивления, подчиняющихся разным законам, требует при моделировании одновременного выполнения перечисленных кри-

териев подобия. Трудности такого подхода общеизвестны. Поэтому во всем мире продолжается поиск новых материалов для имитации ледовых условий, технологии испытаний и способов пересчета результатов на натуру.

Казалось бы, таким образом, материал мог бы быть тонкий естественный лед, однако его высокая прочность по сравнению с требуемой  $\sigma_m = \sigma_n / \lambda$ , при сохранении геометрического подобия по толщине  $h_m = h_n / \lambda$ , делали его малоприменимым. Различные способы ослабления прочности часто приводили к тому, что лед становился более пластичным, чем упругим, нарушалось соотношение  $\sigma/E = \text{idem}$  и связанная с этим геометрия ломки льда, а следовательно, и динамическое подобие.

Однако выход при частичном подобии и раздельном моделировании при определении сопротивления разрушения и обломков может быть найден. Задача формулируется так: для заданной модели ледяного покрова получить способ пересчета результатов на натуру. Для получения дополнительных критериев подобия воспользуемся уравнением, описывающим НДС ледяного покрова, приведенным к безразмерному виду

$$\frac{D}{\rho g L^4} \bar{w} + \frac{\rho_l h}{\rho_b g T^2} \bar{w} + \bar{w} = 0, \quad (3)$$

где  $\bar{w}$  - безразмерный прогиб;  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$  - цилиндрическая жесткость;  $L$  - характерный линейный размер;  $T$  - характерный промежуток времени.

В тех случаях, когда инерционными составляющими сопротивления можно пренебречь и, учитывая, что  $\rho_{в м} = \rho_{в н}$ ,  $g_m = g_n$ , получим

$$\lambda_h = \frac{h_n}{h_m} = \lambda^{3/4} \left( \frac{E_m}{E_n} \right)^{1/3} = \lambda^{4/3} \lambda_E^{-1/3}, \quad (5)$$

где  $\lambda_E = \frac{E_n}{E_m}$ .

Естественный лед имеет повышенную прочность по сравнению с требуемой строгой теорией моделирования, поэтому, очевидно, и получило распространенное мнение о невозможности его использования. При использовании естественного льда компенсировать повышенную прочность льда  $\sigma_{н м}$  можно меньшей толщиной, чем требуется (4). Моделируется только разрушение.

На возможность такого подхода указывал еще Л.М. Ногид, в конце 50-х годов прошлого столетия этот способ использовался в Гамбургском опытовом бассейне, причем пересчет сил велся по кубу линейного масштаба, а толщина льда выбиралась кратной величине  $\lambda^{3/2}$ .

Необходимо отметить, что естественный лед является по существу единственной моделью для полунатурных испытаний, к которым нередко приходится прибегать, и к пересчету их результатов можно применить также предложенный здесь способ.

Поскольку одновременное моделирование всех составляющих при движении моделей в тонком естественном льду невозможно, выход был найден в раздельном моделировании и соответствующем пересчете результатов на натуру составляющих разрушения и сопротивления обломков. Способ пересчета в некоторой степени аналогичен методике пересчета испытаний на чистой воде, когда сопротивление трения рассчитывают, а остаточное пересчитывают в соответствии с законом подобия Фруда.

Сопротивление воды может быть определено традиционным способом при испытаниях в чистой воде. Однако в этом, как правило, нет необходимости ввиду малости этой величины, поэтому его можно определить совместно с  $R_{обл}$  и пересчитать на натуру по кубу масштаба.

Для проверки возможности такого моделирования в ледовом бассейне НГТУ были проведены испытания четырех моделей речного ледокола Р-47, представляющих масштабную серию.

Кроме этого, испытывалась модель ледокола "Капитан Чечкин" в масштабе 1:50 и некоторые другие. Результаты испытаний показали удовлетворительную сходимость с натурными данными. Пересчет сопротивления для масштабной серии ледокола Р-47 не выявил заметного масштабного эффекта.

Визуальные наблюдения, а также результаты анализа кино- и фотосъемок показали, что геометрические размеры льдинок и их форма, а также процесс взаимодействия со льдом близок к наблюдаемому в натуральных условиях.

Испытания такого рода не лишены и недостатков. В частности, не выполняется соответствие между силами упругости и тяжести ледяного покрова. Последнее обстоятельство не позволяет, например, пересчитать результаты испытаний во льду СВП. Не просто обеспечить выполнение условия  $f=idem$ .

Приведенный способ моделирования не противопоставляется более строгому, основанному на подборе материала модели льда. Однако он позволяет расширить объемы исследований, применяя недорогое оборудование, простую технологию и повышая производительность.

Поиски моделей ледяного покрова, более полно удовлетворяющих условиям подобия и обладающих высокой технологичностью и производительностью, привели к созданию новой модели льда композитной конструкции.

Предложены две основные схемы ледяного покрова композитной конструкции. В первой применяются гранулы, диаметр которых соответствует толщине модели льда (рис.1). Причем  $d_m = h_m = h_n / \lambda$ . Изменяя толщину замерзшего слоя воды  $h_1$ , можно изменять приведенную прочность от нуля до прочности льда заданной толщины и масштаба.

Во второй схеме применяются более мелкие гранулы, промораживаемые на всю толщину нанесенного слоя. При этом толщина модельного льда  $h_m$  определяется толщиной слоя частиц, а предел прочности на изгиб  $\sigma_m$  и модуль упругости  $E_m$  практически не зависят от толщины модельного льда. При этом приведенная прочность моделированного льда снижается за счет уменьшения эффективного поперечного сечения естественного льда, находящегося в виде прослоек "сотовой" конструкции и слабой адгезии полиэтилена со льдом.

Используя (4), запишем

$$\frac{E_n h_n^3}{E_m^* h_m^3} = \lambda^4, \quad (6)$$

где  $E_m^*$  - приведенный модуль упругости льда композитной конструкции.

Как показали опыты, функциональная зависимость  $E^*(h)$  остается с точностью до постоянной той же, что и для естественного льда  $E(h)$ . Модуль пересчета можно представить так:

$$\lambda_E^* = \frac{E_n}{E_m^*} = a \frac{E_n}{E_m} = a \lambda_E, \quad (7)$$

где  $a$  – коэффициент, численное значение которого можно принимать равным 2,9.

В этом случае модуль пересчета толщин льда из (6):

$$\lambda_h = \lambda^3 \lambda_E^{*-1} = \lambda^3 \lambda_E^{-1} a^{-1} = 0,70 \lambda^3 \lambda_E^{\frac{4}{3}}, \quad (8)$$

причем  $\lambda_E$  можно определить экспериментально.

Технология проведения испытаний моделей во льду композитной конструкции и способов пересчета результатов на натуре следующие:

- поверхность воды в бассейне покрывается слоем (или несколькими слоями) гранул полиэтилена, после чего происходит промораживание части слоя на некоторую величину  $h_{1m}$ .

- модель буксируется во льду; при постоянной тяге ( $Pe_M = \text{const}$ ) при этом определяется скорость модели  $v_M$  и толщина льда.

После проведения серии испытаний при  $Pe_M = \text{const}$  строятся диаграммы ледопроницаемости модели  $v_M = f(h_M)$  при  $Pe_M = \text{const}$ , которые затем перестраиваются к виду  $R_M = f(v_M)$  при  $h_M = \text{const}$ .

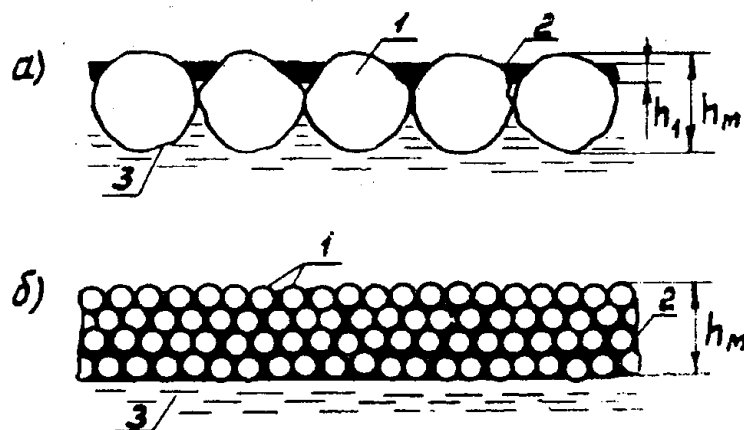
При этом имеется в виду, что прочностные свойства льда соответствуют моделированию по толщине замороженного слоя  $h_{1M}$ , а гравитационные и инерционные общей толщине слоя  $h_M = h_M/\lambda$ . Полученные результаты пересчитываются на натуру следующим образом

$$\left. \begin{aligned} h_H &= h_M \lambda = 0,70 \lambda^{\frac{4}{3}} \lambda_E^{\frac{-1}{3}} h_1 \approx 0,70 \lambda^{\frac{2}{3}} h_1; \\ R_H &= \lambda^3 R_M; \\ v_H &= v_M \sqrt{\lambda}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Модельный лед композитной конструкции со стабильными характеристиками легко приготовить в открытых опытовых бассейнах в зимнее время, причем значительные колебания температуры воздуха практически не оказывают влияния на адгезионные свойства полиэтилена и влияют лишь на скорость роста льда. Производительность работ при проведении опытов значительно возрастает (например, при  $t_{\text{возд}} = -10^0$ , цикл проведения опыта в бассейне составляет 1,0–1,5 ч), т.е. выше в несколько раз по сравнению с известными.

К положительным эффектам новой технологии является и то, что диаграммы разрушения льда композитного и естественного реальных толщин близки, что приводит к большому соответствию работ разрушения и геометрии обломков льда в натуральных и модельных условиях. Заметим, что немаловажным является и обеспечение условия  $f = \text{idem}$ , поскольку  $f_M = 0,19-0,25$ . Обобщенные данные МКОБ по натурным измерениям коэффициента трения льда о судно составляют  $0,3 \pm 0,07$  при  $v \rightarrow 0$  и  $0,10 \pm 0,12$  при реальных скоростях движения.

Сопоставление результатов модельных испытаний ледоколов пр. Р-47, 1105 и др. с натурными данными вполне удовлетворительное.



**Рис. 1** Схемы ледяного покрова композитной конструкции:  
 а – гранулы «большого» диаметра; б – мелкие гранулы;  
 1 – гранулы полиэтилена; 2 – естественный лед; 3 – вода

Как и в естественном льду, во льду композитной конструкции были проведены испытания модели R - класса, а результаты сравнения с данными других бассейнов и с натурными показаны на рис. 2 и рис. 3.

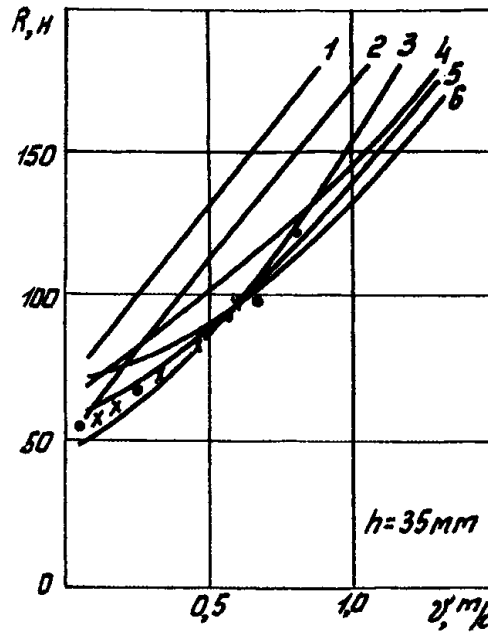


Рис. 2. Сопротивление модели R-класса в бассейнах:  
 1 – WARS; 2 – IMD; 3 – NSVA; 4 – JSRI; 5 – CRREL; 6 – NKK; • – в бассейне (естественный лед); x – в бассейне (композитный лед)

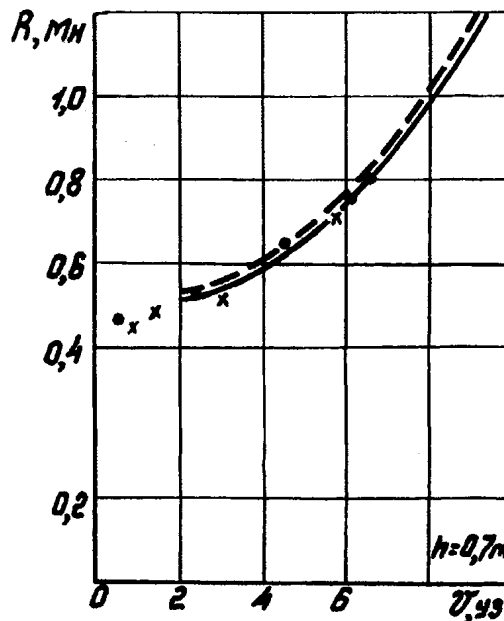


Рис. 3. Сопротивление ледокола R-класса во льду по данным натурных испытаний и по пересчету испытаний модели в бассейне НГТУ:  
 • – естественный лед; x – композитный лед

Результаты сопоставления подтверждают возможность описанного подхода к моделированию взаимодействия судов со льдом.

При испытаниях моделей судов в битых льдах в настоящее время используются обычные (не ледовые) опытовые бассейны, наполненные пресной водой. Как показали наши исследования, наиболее подходящим материалом для имитации битого льда, получившим распространение в большинстве опытовых бассейнов в настоящее время является полиэтилен высокого давления. Плотность этого материала  $0,92 \text{ т/м}^3$ . Таким образом, плотность во-

ды и льда с большой точностью соответствуют льду пресных водоемов. Для морского льда необходимо вводить коррективы. Во-первых, морская вода имеет большую плотность, а во-вторых, морской лед – меньшую плотность. Огромное противоречие прогнозов ледового сопротивления, по нашему мнению, является результатом игнорирования этих фактов. При этом нетрудно заметить, что составляющие прямого и скоростного сопротивления подлежат непосредственному экспериментальному разделению. Этот факт позволяет ввести коррективы в схему пересчета ледового сопротивления с учетом фактических плотностей воды и льда.

При плотности морской воды  $1,025 \text{ т/м}^3$ , морского льда  $0,89 \text{ т/м}^3$ , пресноводных воды и льда соответственно  $1,000 \text{ т/м}^3$  и  $0,92 \text{ т/м}^3$ , эта разница равна  $0,175 \text{ т/м}^3$  для воды и  $0,080 \text{ т/м}^3$  для льда. То есть прямое сопротивление при пересчете на морской лед необходимо увеличивать в 1,7 раза.

Скоростное сопротивление, разделяемое на инерционное и гидродинамическое, не позволяет экспериментальное разделение. Инерционное сопротивление пропорционально плотности льда, а гидродинамическое – плотности воды. Учитывая большую определенность плотности воды, по аналогии с гипотезой Фруда для остаточного сопротивления, будем полагать (до получения проверенных данных) скоростное сопротивление пропорциональным сопротивлению воды.

Это обстоятельство необходимо учитывать при пересчете ледового сопротивления судов, плавающих в соленой воде при испытаниях модели в пресной воде. Как показали наши эксперименты, не учет этого обстоятельства может привести к результатам, отличающимся на 25-30%.

В этом случае прямое (при  $v \rightarrow 0$ ) ледовое сопротивление можно пересчитать следующим образом:

$$R_{\text{пр}}^{\text{н}} = R_{\text{пр}}^{\text{м}} \left( \frac{\rho^{\text{с}} - \rho_{\text{л}}^{\text{с}}}{\rho^{\text{п}} - \rho_{\text{л}}^{\text{п}}} \right) \lambda^3, \quad (10)$$

скоростная составляющая

$$R_{\text{ск}}^{\text{н}} = R_{\text{ск}}^{\text{м}} \frac{\rho^{\text{с}}}{\rho^{\text{п}}} \lambda^3, \quad (11)$$

где  $\rho^{\text{с}}$ ,  $\rho_{\text{л}}^{\text{с}}$  – плотность соленой воды и льда;  $\rho^{\text{п}}$ ,  $\rho_{\text{л}}^{\text{п}}$  – плотность пресной воды и льда.

#### Библиографический список

1. **Каштелян В.И.** Сопротивление льда движению судна / В.И. Каштелян, И.И. Позняк, А.Я. Рывлин. – Л.: Судостроение, 1968. – 238 с.
2. **Зуев, В.А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 207 с.
3. **Ионов, Б.П.** Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.

Дата поступления  
в редакцию 02.08.2011

**V.A. Zuev, E.M. Gramuzov, D.A. Semenov**

#### MODELING OF SHIP ICE RESISTANCE

The questions of creation of new physical model of ice cover for imitation model research of interaction of courts with ice are considered.

*Key words:* ice conditions, resistance, broken ice, vessel, physical and mechanical characteristics.