УДК 629.5.016.8+551.321.8:629.5.018.13
EDN: FYHMAC

Е.М. Грамузов, Н.В. Калинина, А.А. Куркин
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СПЛОШНОГО ЛЬДА ДВИЖЕНИЮ ЛЕДОКОЛА

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является теория моделирования ледовой ходкости судов. Цель – показать, что при частичном моделировании ледяного покрова отклонения физико-механических свойств модельного льда от требуемых теорией подобия свойств компенсируются введением специальных поправок.
Материалы и методы. Рассмотрено математическое и физическое моделирование движения судов. Приведены подходы к физическому моделированию ледовой ходкости. Рассмотрены критерии моделирования и требования, предъявляемые к моделям ледяного покрова.
Основные результаты. Проанализированы физико-механические характеристики моделей ледяного покрова. Перечислены варианты модельного льда, используемые в различных ледовых опытовых бассейнах. Основное внимание сконцентрировано на моделях сплошного ледяного покрова. Обоснована методология пересчета результатов испытаний моделей на натурные суда.
Заключение. В модельном эксперименте при физическом моделировании ледового сопротивления судов необходима фиксация физико-механических свойств льда в каждом опыте. Рациональным является пересчет ледового сопротивления с модели на натурное судно с использованием полуэмпирических моделей с настроенными на экспериментальные данные эмпирическими коэффициентами.
Ключевые слова: лед, модель ледяного покрова, ледовое сопротивление, физическое моделирование, ледовый опытовый бассейн.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

УДК 629.5.016.8+551.321.8:629.5.018.13
EDN: FYHMAC

E.M. Gramuzov, N.V. Kalinina, A.A. Kurkin
Nizhny Novgorod Technical University named after R.E. Alexeev, Nizhny Novgorod, Russia

RESISTANCE MODELING OF ICEBREAKERS IN CONTINUOUS ICE SHEETS

Object and purpose of research. This paper discusses ice propulsion performance theory of for ships. The purpose was to demonstrate that in partial simulation of ice sheet the deviations between the values of physical and mechanical properties required by the similarity theory and the actual ones can be compensated by means of special corrections.
Materials and methods. The paper investigates mathematical and physical simulation of ship movement. It presents the approaches to physical modeling of ice propulsion performance, tackling the criteria of modeling and requirements for model ice sheets.
Main results. The authors have analysed physical and mechanical properties for various model ice types, pointing out the ones used in ice basins over the world. The main focus is made on the models of continuous level ice, with justification of model test data extrapolation to full-scale ships.
Conclusion. Physical modeling of ice resistance in model test environment requires recording physical and mechanical properties of ice in each experiment. An optimal way for model test data extrapolation to the full scale is to use semiempirical models with coefficients adopted as per the experimental results.
Keywords: ice, model ice, ice resistance, physical modeling, ice basin.
The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Физическое моделирование сопротивления сплошного льда движению ледокола. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; Специальный выпуск 1: 81–85.
For citations: Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Kurkin A.A. Resistance modeling of icebreakers in continuous ice sheets. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; Special Issue 1: 81–85 (in Russian).

Введение

В освоении уникальных природных ресурсов Арктики универсальными средствами являются суда ледовых классов. При изучении ледовой ходкости судов применяется математическое и физическое моделирование. Феноменология и математические модели процессов строятся на основе натурных и модельных наблюдений и экспериментов.

При построении теоретических моделей используются допущения и упрощения физической реальности, которые для практических целей компенсируются эмпирическими коэффициентами, полученными экспериментально в полуэмпирических моделях. Натурные эксперименты, обладая наибольшей надежностью, ограничены по объему и возможности варьирования определяющих факторов. Поэтому физическое моделирование является эффективным средством изучения ледовой ходкости судов.

Физическое моделирование ледовой ходкости судов осуществляется в опытовых бассейнах на малоразмерных моделях. Модели судов выполняются геометрически подобными, а физические модели ледяного покрова (лабораторного льда) подлежат обсуждению.

Теория моделирования ледяного покрова

Классическая теория моделирования ледовой ходкости судов, основанная на теории подобия и размерностей, разработана Л.М. Ногидом и Ю.А Шиманским [1–4]. Рассматриваемая теория определяет ряд критериев подобия, которые при модуле геометрического подобия $\lambda = L_н/L_м$ формулируются так:

$$\frac{h_Н}{h_М}=\frac{E_Н}{E_М}=\frac{\sigma_Н}{\sigma_М}=\lambda;\ \frac{\mu_Н}{\mu_М}=\frac{\rho_{Л_Н}}{\rho_{Л_М}}=\frac{f_Н}{f_М}=1; \quad (1)$$

$$\frac{v_Н}{v_М}=\lambda^{1/2};\ \frac{R_Н}{R_М}=\lambda^3, \quad (2)$$

где L – характерный линейный размер; h – толщина ледяного покрова; E – модуль упругости льда; σ – предел прочности льда; μ – коэффициент Пуассона; $\rho_л$ – плотность ледяного покрова; f – коэффициент трения пары «лед – корпус судна»; v – скорость хода; R – ледовое сопротивление. Индексы «н» и «м» относятся к натуре и модели соответственно.

К физической модели ледяного покрова предъявляются дополнительные требования [3, 4]:

- материал модели должен быть упругим;
- механизм разрушения модели должен быть аналогичным натуре;
- должны быть обеспечены стабильность и повторяемость физико-механических характеристик модели.

Условия моделирования можно несколько ослабить (упростить), если использовать подход, основанный на использовании уравнений равновесия (деформирования) ледяного покрова.

Необходимым условием моделирования разрушения является геометрическое подобие картин разрушения льда в плане, при выполнении которого число и расположение точек контакта льда с корпусом при движении модели будет соответствовать натуре.

Подобие картин разрушения определяется подобием напряженно-деформируемого состояния (НДС) ледяных пластин, для определения которого воспользуемся дифференциальным уравнением изгиба пластин на упругом основании, приведенном к безразмерному виду:

$$\frac{D}{\rho g L^4}\nabla^4\overline{w}+\overline{w}=0, \quad (3)$$

где $\overline{w}=\frac{w}{l}$ – безразмерный прогиб; D – цилиндрическая жесткость ледяной пластины; ρ – плотность воды.

Из уравнения (3) следует, что НДС ледяного покрова для натуры и модели будет подобным, если

$$\frac{D}{\rho g L^4}=\text{idem}. \quad (4)$$

Т.к. $\rho_н = \rho_м$ и $g = \text{const}$, выражение (4) можно преобразовать к виду:

$$\frac{D_Н}{D_М}=\frac{L_Н^4}{L_М^4}=\lambda^4. \quad (5)$$

Таким образом, при соблюдении условия (5) будет обеспечено подобие картин разрушения льда в плане. Общую формулу расчета составляющей сопротивления разрушения льда $R_р$ можно записать в виде [3]:

$$R_р=\frac{A_р}{l}=\frac{1}{l}\sum_{i=1}^{n}\left[\left(1+f\gamma_{лт}\right)A_{Zi}+A_{Ci}\right], \quad (6)$$

где $A_р$ – энергия разрушения ледяной пластины при продвижении ледокола l; A_{Zi} – энергия ломки ледяной пластины в i-й точке контакта с кромкой; A_{Ci} – энергия смятия (локального разрушения) ледяной

пластины в *i*-й точке контакта с кромкой; $\gamma_{лт}$ – геометрическая характеристика корпуса в зоне контакта со льдом; n – число точек контакта.

При получении теоретической зависимости (6) не использованы какие-либо предположения о геометрии разрушения льда в плане или о величине энергий ломки и локального разрушения льда. Поэтому формулу (6) можно понимать в качестве определения для осредненной энергии разрушения.

Модуль пересчета сопротивления разрушению может быть определен с использованием (6):

$$\lambda_{R\text{р}} = \frac{R_{\text{Рн}}}{R_{\text{Рм}}} = \frac{A_{\text{Рн}} l_{\text{М}}}{A_{\text{Рм}} l_{\text{Н}}} = \frac{l_{\text{М}} \sum_{i=1}^{n_{\text{Н}}} \left[\left(1 + f\gamma_{\text{лт}_i}\right) A_{Zi} + A_{Ci} \right]_{\text{Н}}}{l_{\text{Н}} \sum_{i=1}^{n_{\text{М}}} \left[\left(1 + f\gamma_{\text{лт}_i}\right) A_{Zi} + A_{Ci} \right]_{\text{М}}}. \quad (7)$$

Очевидно, что при геометрически подобной картине разрушения льда в плане

$$\frac{l_{\text{М}}}{l_{\text{Н}}} = \lambda, \ldots \frac{n_{\text{Н}}}{n_{\text{М}}} = \frac{\left(\gamma_{\text{лт}_i}\right)_{\text{Н}}}{\left(\gamma_{\text{лт}_i}\right)_{\text{М}}} = 1. \quad (8)$$

При дополнительных требованиях

$$f_{\text{н}} = f_{\text{м}}; \ A_{Ci}/A_{Zi} = \text{idem}, \quad (9)$$

$\lambda_{R\text{р}}$ можно определить по формуле

$$\lambda_{R\text{р}} = \frac{1}{\lambda} \frac{\left(A_{Zi}\right)_{\text{Н}}}{\left(A_{Zi}\right)_{\text{М}}} = \frac{\lambda_{Zi}}{\lambda}. \quad (10)$$

Использованная в формуле (10) энергия ломки ледяного покрова A_{Zi} зависит от механических свойств льда и геометрии ледяной пластины в зоне контакта с корпусом. Причем A_{Zi} есть наиболее полная характеристика механических свойств ледяного покрова с точки зрения разрушения его ледоколом, охватывающая в интегральном виде все этапы разрушения ледяного покрова: от образования трещин до полного пролома. Применение этого критерия сглаживает некоторые неточности в моделировании отдельных этапов разрушения.

Следует отметить, что для определения масштаба $\lambda_{R\text{р}}$ нет необходимости знать значения A_{Zi} для каждого вида конфигурации пластин в точке контакта. Требуется лишь знать отношение (масштаб) энергий ломки ледяного покрова натуры и модели λ_{Az}, который, очевидно, при подобной геометрии ломки зависит только от свойств льда. Поэтому при экспериментальном определении λ_{Az} можно использовать испытания ледяных пластин различной конфигурации, например, бесконечных или полубесконечных.

Нетрудно заметить, что условия (7) и (10) предъявляют к модели ледяного покрова более легкие требования, чем классическая теория моделирования. Следовательно, упрощается выбор материала и расширяются поиски модели льда.

Теория моделирования ледового сопротивления предполагает создание моделей ледяного покрова и разработку методик приготовления моделированного льда. В настоящее время предложены и используются следующие модели сплошного ледяного покрова: столбчатый моделированный лед, гранулированный моделированный лед, пресноводный лед уменьшенной толщины (рис. 1), модельный лед композитной конструкции (рис. 2) [3, 4].

Условия (1) и дополнительные требования предъявляют к материалу модели льда жесткие условия, которые до настоящего времени в полной мере не удается удовлетворить. Поэтому приходится довольствоваться частичным моделированием льда. Отклонения физико-механических свойств модельного льда от требуемых теорией

Рис. 1. Модель пресноводного льда уменьшенной толщины

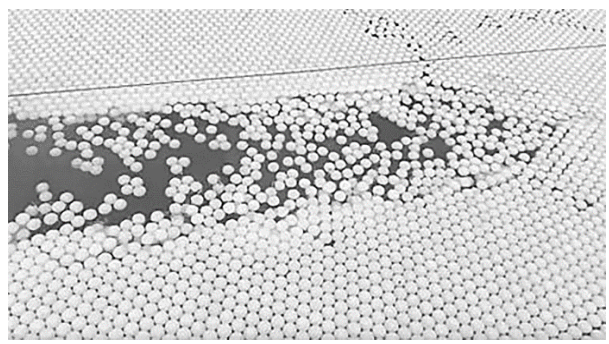

Рис. 2. Модель льда композитной конструкции

подобия свойств компенсируются введением специальных поправок.

Ледовые бассейны самостоятельно разрабатывали методы корректировки экспериментальных данных, основываясь на анализе результатов модельного и натурного экспериментов (метод эталонной модели) [1, 3, 4]. Ледовый комитет Международной конференции опытовых бассейнов (МКОБ) проанализировал методики коррекции, применявшиеся в различных ледовых бассейнах [4]. Были разработаны рекомендации МКОБ по определению ледового сопротивления в ледовых бассейнах. Предложенные методы коррекции используются в работе ледовых бассейнов.

Коррекция по толщине льда

Для коррекции сопротивления судна $R_э$ по толщине льда, полученного в процессе эксперимента, используется эмпирическое соотношение, задаваемое следующей формулой:

$$R \approx h^x R_э, \tag{11}$$

где R – прогнозируемое сопротивление.

Задание величины показателя степени x в выражении (11) осуществляется на основании либо статистических данных, имеющихся в бассейнах, либо данных модельных экспериментов, проведенных с одной и той же моделью судна в двух различных по толщине полях моделированного льда. Из практики ледовых бассейнов известно, что величина x лежит в пределах от 1 до 2. Если величина x неизвестна, ее часто рекомендуется принимать равной 1,5 [4].

Коррекция по прочности льда на изгиб

При введении коррекции по прочности льда на изгиб используется представление о линейной зависимости ледового сопротивления от прочности льда на изгиб при постоянных значениях толщины льда h и скорости движения модели v. В соответствии с этим представлением применяется следующая формула [4]:

$$R = R_Э \left[1 + \sigma_a \left(\frac{\sigma_{И_Н}}{\sigma_{И_М}} - 1 \right) \right], \tag{12}$$

где $\sigma_{И_Н}$ и $\sigma_{И_М}$ – прочность льда на изгиб натуры и модели; σ_a – коэффициент, показывающий, какая часть ледового сопротивления зависит от прочности льда на изгиб.

Основная сложность в использовании формулы (12) заключается в том, что величина σ_a неизвестна и не является постоянной. Она зависит как от прочности льда на изгиб, так и от толщины льда. В практике работы ледовых бассейнов величину σ_a определяют на основании имеющегося опыта.

Коррекция по величине коэффициента трения

В практике работы ледовых бассейнов часто возникает необходимость корректировки полученных экспериментальных данных на величину коэффициента трения льда об обшивку корпуса. Согласно теории подобия этот коэффициент должен быть одинаковым для натурных и модельных условий. В соответствии с рекомендациями МКОБ общей формулой для учета влияния изменения коэффициента трения является следующая зависимость [4]:

$$R = C_μ R_э, \tag{13}$$

где $C_μ$ – корректирующий коэффициент.

Пересчет ледового сопротивления с модели на натуру

В большинстве ледовых опытовых бассейнов сопротивление модели на натуру пересчитывается по кубу масштаба $R_н = R_м \lambda^3$ с введением эмпирических поправок по толщине льда, прочности льда на изгиб, величине коэффициента трения (11–13). На наш взгляд, при этом происходит потеря физического смысла. Т.к. составляющие сопротивления разрушения и обломков льда по-разному зависят от перечисленных величин, то линейная корректировка полного сопротивления выглядит необоснованной. Кроме того, корректируется неполный набор констант (1).

Следует заметить, что предел прочности льда на изгиб неполно характеризует сопротивляемость ледяного покрова движению ледокола [3]. Прочность ледяного покрова с точки зрения ходкости ледокола следует характеризовать проломным усилием Z_{max} и энергией разрушения при проломном усилии A_{Z1} или полной работой разрушения A_Z. Для этого в модельном эксперименте при физическом моделировании ледового сопротивления ледокола необходима фиксация A_{Z1} и A_Z в каждом опыте.

На наш взгляд, более рациональным является пересчет ледового сопротивления с модели на натурное судно с помощью настроенных полуэмпирических моделей [5], наиболее полно учитывающих физико-

механические характеристики ледяного покрова [3]. Для этого при получении эмпирических коэффициентов полуэмпирических моделей используются фактические характеристики модели льда, измеренные во время проведения эксперимента. А при расчете сопротивления натурного судна подставляются параметры натурного льда, заданные техническим заданием на проектирование или определенные данными ледовой разведки, прогнозами синоптиков.

Заключение

Теория моделирования предъявляет к материалу модели льда жесткие требования, которые до настоящего времени в полной мере не удавалось удовлетворить. Поэтому приходится довольствоваться частичным моделированием ледяного покрова. Отклонения физико-механических свойств модельного льда от требуемых теорией подобия свойств компенсируются введением специальных поправок.

В большинстве ледовых опытовых бассейнов сопротивление модели на натурное судно пересчитывается по кубу масштаба с введением эмпирических поправок по толщине льда, прочности льда на изгиб, величине коэффициента трения. При этом происходит потеря физического смысла. Т.к. составляющие сопротивления разрушения и обломков льда по-разному зависят от перечисленных величин, то линейная корректировка полного сопротивления выглядит необоснованной. Кроме того, корректируется неполный набор механических констант.

Предел прочности льда на изгиб неполно характеризует сопротивляемость ледяного покрова движению ледокола. Прочность льда с точки зрения ходкости ледокола следует характеризовать проломным усилием и энергией разрушения. Для этого в модельном эксперименте при физическом моделировании ледового сопротивления ледокола необходима их фиксация в каждом опыте.

Рациональным является пересчет ледового сопротивления с модели на натурное судно с использованием полуэмпирических моделей с настроенными на экспериментальные данные эмпирическими коэффициентами.

Благодарности

Представленные результаты получены по проекту РНФ № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом».

Список использованной литературы

1. *Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я.* Сопротивление льда движению судна. Ленинград : Судостроение, 1968. 238 с.
2. *Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е.* Испытания судов во льдах. Ленинград : Судостроение, 1980. 207 с.
3. *Ионов Б.П. Грамузов Е.М.* Ледовая ходкость судов. Санкт-Петербург : Судостроение, 2013. 504 с.
4. *Сазонов К.Е.* Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2021. 308 с.
5. *Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А.* Перестроение полуэмпирической модели чистого ледового сопротивления при движении судна в сплошном льду // Инженерная физика. 2023. № 11. С. 53–62.

Сведения об авторах

Грамузов Евгений Михайлович, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Кораблестроение и авиационная техника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева». Адрес: 603155, Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24. E-mail: terkor54@mail.ru. https://orcid.org/0000-0003-1549-2063.

Калинина Надежда Викторовна, к.т.н., доцент, заведующая кафедрой «Кораблестроение и авиационная техника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева». Адрес: 603155, Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24. E-mail: nvk5133@mail.ru. https://orcid.org/0000-0001-8474-9665.

Куркин Андрей Александрович, д.ф.-м.н., профессор, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева». Адрес: 603155, Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24. E-mail: aakurkin@nntu.ru. https://orcid.org/0000-0003-3828-6406.

Поступила / Received: 14.05.24
Принята в печать / Accepted: 27.06.24
© Коллектив авторов, 2024