УДК 551.321.8:629.5.018.13
EDN: HUAFUV

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЬДА ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ СУДОВ В ОПЫТОВОМ БАССЕЙНЕ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются физико-механические свойства (ФМС) модельного ледяного покрова, используемого в опытовых бассейнах для прогнозирования ледовой ходкости судов. Цель – показать необходимость и способы фиксации физико-механических свойств моделей ледяного покрова при проведении экспериментов и физическом моделировании.

Материалы и методы. Рассмотрено физическое моделирование движения судов во льдах как эффективное и надежное средство изучения ледовой ходкости. Описаны экспериментальные методы определения физико-механических свойств моделей ледяного покрова.

Основные результаты. Проанализированы физико-механические свойства моделей ледяного покрова (плотность, упругость, прочность, деформация и разрушение ледяного покрова под нагрузкой, трение льда о корпус судна) и рассмотрены физические принципы и способы их измерения. Описаны приборы и оборудование для определения ФМС моделей льда в открытых (атмосферных) ледовых бассейнах.

Заключение. Измеряемые физико-механические свойства моделей ледяного покрова, включая скорость движения и ледовое сопротивление, используются для настройки полуэмпирических моделей сопротивления. Настроенные полуэмпирические модели сопротивления рекомендуются для прогнозирования ледовой ходкости судов на ранних стадиях проектирования.

Ключевые слова: модель ледяного покрова, физико-механические свойства, ледовый опытовый бассейн, физическое моделирование, ледовое сопротивление.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

УДК 551.321.8:629.5.018.13
EDN: HUAFUV

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

DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL ICE PROPERTIES IN MODEL ICE PROPULSION PERFORMANCE TESTS OF SHIPS

Object and purpose of research. This paper discusses physical and mechanical properties of model ice used by test basins for ice propulsion tests of ships. The purpose was to describe why physical and mechanical properties of model ice must be measured during the tests and how these measurements are performed.

Materials and methods. The authors present model tests of ships as an efficient and reliable tool of ice propulsion performance studies, describing the methods for experimental determination of physical and mechanical properties for model ice.

Main results. The paper analyses physical and mechanical properties of various model ice types in terms of density, elasticity, straining, breaking load, hull friction properties, etc., elucidating the physics behind given measurement type and the technique of measurement performance. It also describes equipment and instrumentation for measurement of physical and mechanical ice properties in outdoor ice tanks.

Для цитирования: Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Определение физико-механических свойств льда при прогнозировании ледовой ходкости судов в опытовом бассейне. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; Специальный выпуск 1: 86–92.

For citations: Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Kurkin A.A. Determination of physical and mechanical ice properties in model ice propulsion performance tests of ships. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; Special Issue 1: 86–92 (in Russian).

Conclusion. Physical and mechanical properties of ice relevant for model ice testing, e.g. for ice resistance or ice propulsion performance studies, are used to fine-tune semi-empirical models of ice resistance calculation. The models thus fine-tuned are recommended for ice propulsion predictions of ships at early design stages.
Keywords: model ice, physical and mechanical properties, ice basin, model tests, ice resistance.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

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 определение физико-механических свойств модельного ледяного покрова подлежит обсуждению. К ФМС относят: толщину, плотность, упругость, прочность, трение льда о корпус судна [1–4]. Состав ФМС должен быть расширен за счет включения дополнительных характеристик, учитывающих кинематические, силовые и энергетические особенности разрушения ледяного покрова под нагрузкой [3].

Плотность материала модели ледяного покрова

Поиск новых методов моделирования ледового покрова постоянно продолжается. Согласно классической теории моделирования ледовой ходкости судов плотности натурного и модельного льда должны совпадать. В качестве модельного льда используют различные материалы [3, 4].

Для определения плотности материала используются следующие методы:

- непосредственное определение массы m и объема образца материала V, тогда плотность образца льда $\rho_л$ определяется:
- $\rho_л = m/V;$ (1)
- методы гидростатического взвешивания с помощью жидкостей большей или меньшей плотности, чем плотность исследуемого образца.

При меньшей плотности жидкости, например взвешивание в керосине [3], плотность льда можно определить:

$$\rho_Л = \frac{\rho_К}{1 - P_К / P_Л}, \quad (2)$$

где $\rho_к$ – плотность жидкости (керосина); $P_л$ – вес образца модели льда; $P_к$ – вес образца модели льда, погруженного в жидкость (керосин).

При большей плотности жидкости, чем плотность материала образца, например взвешивание в пресной воде [4]:

$$\rho_Л = \rho \frac{P_2 - P_1}{P_3 - P_1}, \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости (пресной воды); P_1 – вес емкости с жидкостью (пресной водой); P_2 – вес емкости с жидкостью и со свободно плавающим образцом модели льда; P_3 – вес емкости с жидкостью и с притопленным под свободную поверхность образцом модели льда.

Эти методы имеют свои достоинства и недостатки. Наиболее точным измерениям с помощью современных электронных весов поддаются измерения массы m и весов P_1, P_2, P_3.

В методе (1) проблемным является определение объема образца материала V из-за неправильной формы, выломанной в эксперименте льдинки и непостоянной ее толщины. Этот метод применяется при моделировании сопротивления в битом льду с использованием льдинок правильной геометрической формы [3].

В методе (2) дополнительно необходимо знать плотность жидкости (керосина), кроме того технически сложнее измерить вес подвешенного образца льда $P_к$ и $P_л$. Поэтому метод (3) является предпочтительным при моделировании сопротивления сплошного льда.

Толщина модели ледяного покрова

Для однородной модели ледяного покрова постоянной толщины измерения выполняются с помощью охлажденного штангенциркуля. Льдинки модельного льда достаются сразу после прохода модели в разных районах по длине из центра проложенного канала.

Для композитных моделей ледяного покрова, имеющих неплоскую поверхность, определение приведенной толщины следует выполнять следующим образом. Изъятая из ледового канала льдинка планиметрируется для определения ее площади S. Затем по формуле (3) рассчитывается ее осредненная плотность $\rho_л$. Рассчитывается объем льдинки

$$V = (P_3 - P_1)/\rho_л. \quad (4)$$

Осредненная толщина композитного льда $h_м$ определяется по формуле

$$h_м = V / S. \quad (5)$$

Технология определения плотности и толщины модели ледяного покрова

Последовательность технологических операций при определении плотности и толщины модели ледяного покрова может быть следующей (рис. 1):

- технологической емкостью необходимых размеров (пищевой полиэтиленовый контейнер) из проложенного моделью судна канала зачерпывается льдинка вместе с водой;
- емкость с плавающей в воде льдинкой помещается на чашу электронных весов, фиксируется вес P_2;
- плавающая льдинка фотографируется с применением координатной сетки для определения ее площади S;
- льдинка притапливается технологической вилкой с пренебрежимо малым объемом погружаемых зубцов и фиксируется вес P_3;
- льдинка вынимается из емкости приспособлением (пинцет, сетчатая лопатка), не препятствующим стеканию воды, и фиксируется вес P_1;
- плотность и толщина модели льда рассчитываются по формулам (3)–(5).

Упругость модельного ледяного покрова

Упругие свойства материала (льда) характеризуют модулем деформации (модулем Юнга) $E = \sigma/\varepsilon$, где σ – напряжение, равное силе, деленной на площадь ее приложения (модуль упругости); ε – упругая деформация, эквивалентная отношению удлинения образца с начала деформации и сжатию после ее прекращения.

Модуль упругости сильно зависит от режима нагружения. В связи с этим принято различать статический $E_{ст}$ и динамический $E_д$ модули упругости. При динамическом нагружении модуль упругости возрастает.

Модуль упругости E характеризует сопротивляемость ледяной пластины упругой деформации при растяжении или сжатии и линейно связан с цилиндрической жесткостью D ледяной пластины:

$$D = \frac{Eh^3}{12\left(1-\mu^2\right)}, \quad (6)$$

где h – толщина ледяной пластины; μ – коэффициент Пуассона.

Величина модуля $E_{ст}$ определяет прогиб и кривизну ледяного покрова при действии статической нагрузки. Статический модуль упругости $E_{ст}$ может быть измерен при растяжении или сжатии образцов

Рис. 1. Последовательность определения плотности модельного льда

льда. Однако плавающий сплошной ледяной покров, как известно [2], представляет собой ортотропную ледяную пластину с переменными по толщине свойствами. Поэтому под $E_{ст}$ в математических моделях деформации ледяного покрова поперечной нагрузкой понимают осредненную по толщине величину, определяемую с помощью нагружения (деформирования) плавающей ледяной пластины.

Для этого используют два экспериментальных метода [3, 4]. Это нагружение вертикальной силой Z выпиленных из ледяного покрова жесткозаделанных консолей (клавиш) и «бесконечных» плавающих пластин с измерением их прогибов w под силой в упругой зоне деформирования. Осредненный $E_{ст}$ ортотропной ледяной клавиши рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{СТ}} = \frac{4Zl^3}{bh^3 w}, \tag{7}$$

где h, l, b – толщина, длина и ширина ледяной клавиши.

В натурных экспериментах реально применять лишь испытания клавиш с рекомендуемыми размерами [2–4]. В модельных экспериментах, на наш взгляд, предпочтительно применять испытание пластин, контролируя размеры пластины в плане. Удаление точки приложения вертикальной силы от краев бассейна – на расстояние более чем три полуволны изгиба ледяной пластины на упругом основании. При проведении экспериментов в открытых (атмосферных) ледовых бассейнах измерение $E_{ст}$ следует проводить при каждом приготовлении модельного ледяного покрова непосредственно до и после буксировки модели ледокола. Следует учитывать, что величина $E_{ст}$ зависит от используемой модели льда, температуры воды, температуры и влажности воздуха, атмосферного давления и облачности.

Герц [8] получил для центрального изгиба бесконечной пластины сосредоточенной силой Z решение в виде

$$w = -\frac{Zr^3}{2\pi D}\,\text{kei}\overline{R}, \tag{8}$$

где $\text{kei}\overline{R} = \text{kei}(R/r)$ – функция Кельвина нулевого порядка (модифицированная функция Бесселя); R – текущий радиус в полярной системе координат; $r = 1/\alpha$ – характерный линейный размер при изгибе льда; $\alpha = (\rho g/D)^{1/4}$ – параметр изгиба пластины на упругом основании; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения.

В начале координат $\text{kei} = -\pi/4$ и прогиб под нагрузкой равен $w_0 = Z r^2/8D$. Эта формула может быть рекомендована для определения $E_{ст}$ для модели ледяного покрова:

$$E_{\text{СТ}} = \frac{3(1-\mu^2)}{16\rho g h}\left(\frac{Z}{w}\right)^2. \tag{9}$$

Прочность и разрушение ледяной пластины

В феноменологических и математических моделях ледовой ходкости сопротивляемость ледяного покрова движению судна обычно характеризуется так называемой прочностью льда на изгиб $\sigma_и$ [1–4]. Это связано с изгибным характером разрушения ледяной пластины при взаимодействии с корпусом судна. Для определения $\sigma_и$ используют излом клавиши, выпиленной в ледяном поле вертикальным усилием.

Предел прочности льда на растяжение в месте излома рассчитывается по модели разрушения жесткозаделанной консольной балки из анизотропного материала. Это напряжение для ортотропного льда и называют пределом прочности льда на изгиб:

$$\sigma_{\text{И}} = \frac{6Zl}{bh^2}. \tag{10}$$

Наибольшие изгибающие моменты, а, следовательно, и изгибные напряжения возникают вблизи места приложения нагрузки. Вследствие этого при достижении в локальной области критических значений напряжений образуется радиальная трещина. Расчеты и опыт показывают, что нагрузка, вызывающая появление радиальных трещин, невелика и много меньше той, которая приводит к потере несущей способности ледяного покрова [3].

Отметим, что пластина, разделенная трещинами, не имеет свойства сплошности, и применение полученных решений в том виде, как они записаны, для дальнейшего анализа не имеет смысла. Поэтому решение Герца и аналогичные ему не дают ответа о величине нагрузки, приводящей к гарантированному пролому льда.

Ряд авторов [3 и др.] предлагали полуэмпирическую модель разрушения пластины и клина с произвольным углом в виде:

$$Z = k\,\sigma_и\,h^2, \tag{11}$$

где $k = 0{,}520\,\theta/\pi$ – коэффициент, зависящий от угла при вершине клина.

Последняя зависимость нашла достаточно широкое применение в практических расчетах. Появление радиальных трещин можно рассматривать как предел грузоподъемности ледяного покрова, но даже появление кольцевых неэквивалентно потере несущей способности и полному пролому льда. Все приведенные зависимости дают удовлетворительное совпадение лишь до образования трещин. Учет влияния берегов трещин при деформации полубесконечной ледяной пластины приведен в работе [3].

Некоторые исследователи пытались уточнить решение введением анизотропии по толщине льда, т.е. рассматривая изгиб ортотропной пластины. Естественно, что ледяной покров с температурным градиентом по толщине имеет и различие в механических свойствах, по толщине льда.

Например, в работах [6, 7] вводится цилиндрическая жесткость в виде:

$$D = \int_0^h \frac{E(z)Z^2}{1-\mu^2(Z)}dz\,. \qquad (12)$$

В работе [7] предлагается принимать

$$E(z) = E_0\left[1-(1-\zeta)\left(\frac{z}{n}+\frac{z_0}{n}\right)^n\right], \qquad (13)$$

где z – изменяется от 0 до h.

Показано, что для $\zeta = 0{,}2$, $n = 0{,}5$ и $n = 2{,}0$ $E(z)$ отличается на 30 %, а распределение напряжений по толщине льда изменяется незначительно при изменении n в достаточно широких пределах.

Критерий разрушения ледяного покрова в виде критических значений напряжений (например, $\sigma_и$) соответствует лишь началу образования трещин. Слишком велика разница между теоретическими выводами и экспериментальными наблюдениями пролома льда. Показано также, что различные уточнения теории в виде изменения форм нагрузки, учет анизотропии материала и т.д. не приводят к существенному изменению результатов.

Для оценки качественных и количественных показателей разрушения льда было проведено несколько серий опытов в полевых и лабораторных условиях. Эти опыты вместе с наблюдениями за движением судов во льдах позволили заключить, что разрушение ледяного покрова представляет сложный процесс, состоящий из ряда фаз [3].

В начальной фазе при увеличении прогибов нарастают напряжения в ледяном покрове. При достижении предельных значений напряжений $\sigma_и$ при центральном изгибе лавинообразно образуются радиальные трещины, расходящиеся в виде лучей.

Во второй фазе при дальнейшем возрастании нагрузки и деформации ледяного покрова образуется система концентрических трещин, возникающих последовательно от периферии к центру. Разделенная трещинами ледяная пластина представляет собой конструкцию, состоящую из ледяных блоков. При этом несущая способность ледяного покрова не исчерпана, она продолжает воспринимать дополнительную значительную нагрузку. Это обусловлено взаимодействием отдельных блоков, возникающим при их деформациях по берегам трещин.

Анализ показал, что при деформациях ледяных клиньев, а часто и при деформациях изгиба и сжатия на берегах трещин возникают контактные напряжения и соответствующие им усилия распора. Эти усилия уравновешивают внешнюю нагрузку и способствуют увеличению несущей способности ледяного покрова. Последняя фаза состоит в проворачивании блоков под нагрузкой, и ее достижение следует считать полным проломом ледяного покрова.

Характерная диаграмма разрушения показана на рис. 2. Анализ диаграмм показал, что все они достаточно однотипны и имеют общие участки, состоящие из восходящей *1* и нисходящей (закритической) *2* ветвей. В количественном отношении эти диаграммы можно характеризовать максимальным усилием Z_{max} и прогибом при этом усилии w_{Zmax}, а также прогибом, при котором исчерпана несущая способность ледяного покрова w_Σ. Кроме того, к числу параметров, характеризующих разрушение, отнесем работу, затраченную на деформацию льда A_{Z1} и полную работу разрушения A_Z:

$$A_{Z1} = \int_0^{w_{Zmax}} Z dw\,, \quad A_Z = \int_0^{w_\Sigma} Z dw.$$

Результаты испытаний при центральном изгибе для определения величины Z_{max} были статистически обработаны совместно с аналогичными опытами (при силовом нагружении), приведенными в [7]. Для аппроксимации использована структура формулы, предложенная в [8]:

$$Z_{max} = k_{Zmax}\, h^2. \qquad (14)$$

В известных теоретических и экспериментальных работах коэффициент k_{Zmax} считается пропорциональным прочности льда на изгиб [3, 7, 8 и др.].

Однако под k_{Zmax} правильнее понимать удельную энергию разрушения ледяного покрова, поскольку конечная фаза разрушения, связанная с выворачиванием ледяных блоков, не связана с $\sigma_и$. Это

подтверждается статическим анализом экспериментальных данных, показывающим, что коэффициент $k_{Z\max}$ сохраняет достаточно стабильное значение 1900 кПа со среднеквадратичным отклонением 100 кПа при доверительной вероятности 0,98, в то время как предел прочности льда $\sigma_и$ в опытах изменялся более чем в 2 раза.

Не ставя под сомнение, что $\sigma_и$ характеризует изгибную прочность ледяного покрова, считаем эту характеристику неполной для описания ходкости ледокола в сплошном льду.

Сопротивление разрушения $R_р$ ледяной пластины ледоколом следует понимать как энергетические суммарные затраты ΣA_i, отнесенные к продвижению l (пройденному пути) [3]:

$$R_р = (\Sigma A_{Zi})/\, l, \qquad (15)$$

где A_{Zi} – затраты на разрушение сплошного льда и выворачивание обломков льда в каждой точке контакта корпуса в процессе движения ледокола на пути l.

Продвижение ледокола l может быть выбрано произвольно большим при эргодическом случайном процессе установившегося разрушения льда либо кратным длине цикла, если процесс разрушения льда считать циклическим.

Полная работа разрушения льда в i-й точке контакта может быть вычислена по формуле [3]:

$$A_{Zi} = (1 + f\,\gamma_{ЛТi})\, A_{Z1} + A_{Z2}, \qquad (16)$$

где $\gamma_{ЛТi}$ – функция, характеризующая форму корпуса в точке контакта [3]; f – коэффициент трения корпуса судна о лед; A_{Z1} – работа вертикальной силы, ломающей ледяной покров; A_{Z2} – работа смятия и дробления кромки в месте контакта.

Предлагается прочность ледяного покрова с точки зрения ледовой ходкости характеризовать работой вертикальной силы, ломающей ледяной покров A_{Z1}. Эти энергетические затраты наиболее полно отражают сопротивляемость ледяной пластины движению ледокола.

Технология определения прочностных и упругих характеристик модели льда

Для получения прочностных и упругих характеристик модельного ледяного покрова разработано специальное нагрузочное устройство (рис. 3), позволяющее осуществлять кинематическое нагружение модели льда. Шток устройства, перемещаясь вертикально, деформирует (прогибает) ледяную пластину. При этом синхронно записываются прогиб и вертикальная реакция ледяной пластины. Строится диаграмма нагружения модельного льда $Z = f(w)$, позволяющая определять E, $Z_{\max}$, $w_{Z\max}$, w_Σ, A_Z, A_{Z1} по приведенным выше формулам.

Трение льда о корпус судна

Значительная часть ледового сопротивления обусловлена затратами энергии на преодоление механической работы сил, обусловленных трением льда о корпус судна.

Касательная к обшивке сила сухого трения F по закону Амонтона – Кулона прямо пропорциональна нормальной силе взаимодействия корпуса судна со льдом N:

$$F = f N, \qquad (17)$$

где f – коэффициент трения наружной обшивки корпуса о лед в месте контакта.

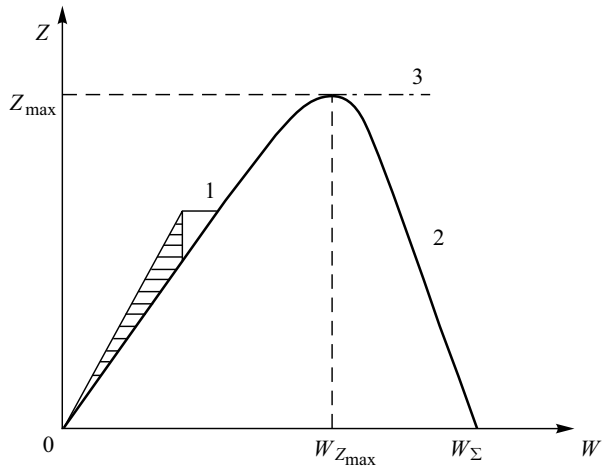

Рис. 2. Диаграмма разрушения ледяной пластины при центральном изгибе

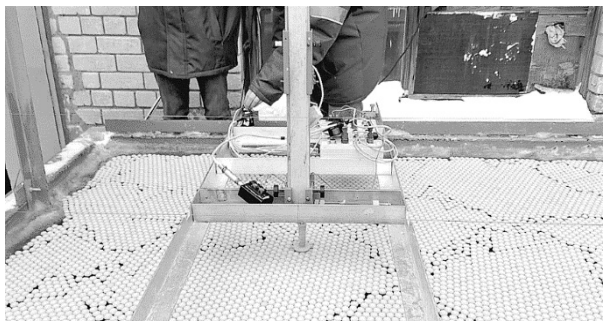

Рис. 3. Нагрузочное устройство для определения модуля упругости модельного ледяного покрова

Сухое трение (17) имеет место при давлении корпуса на кромку ледяного покрова при его разрушении. Контакт корпуса с обломками льда осуществляется при пониженных давлениях и под водой. Таким образом, применение (17) нельзя считать обоснованным. Этот процесс недостаточно изучен, тем не менее в актуальных теоретических и полуэмпирических моделях ледового сопротивления трение учитывается с помощью зависимости (17).

Коэффициент трения пары «корпус судна – лед» $f_н$ определяется покрытием корпуса судна и состоянием поверхности ледяного покрова. Коэффициент трения пары «корпус модели судна – моделированный лед» $f_м$ определяется покрытием корпуса модели и может регулироваться нанесением лакокрасочного покрытия. При подготовке модели за счет выбора материала покрытия и его шероховатости стремятся к $f_м = f_н$.

При проведении модельных испытаний следует контролировать $f_м$ путем буксировки корпуса модели по поверхности модели ледяного покрова с измерением веса модели N и силы сопротивления F по зависимости (17).

Заключение

Проанализированные физико-механические свойства моделей ледяного покрова необходимо измерять в процессе экспериментов в открытых (атмосферных) ледовых бассейнах. К измеряемым параметрам относятся: толщина, плотность, упругость, прочность, деформация и разрушение ледяного покрова под нагрузкой, трение льда о корпус судна.

Все полученные характеристики, включая скорость движения и ледовое сопротивление, используются для настройки полуэмпирических моделей сопротивления, которые наиболее полно учитывают феноменологическую картину взаимодействия корпуса судна со льдом. Настроенные полуэмпирические модели сопротивления рекомендуются для прогнозирования ледовой ходкости судов ледового плавания на ранних стадиях проектирования. Сопротивление натурных судов определяется с использованием настроенных полуэмпирических моделей сопротивления подставкой в качестве исходных данных характеристик натурного судна и натурного льда.

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.
6. *Кобеко П.П. и др.* Пролом и грузоподъемность льда // ЖТФ. 1946. Т. 16, вып. 3. С. 17–21.
7. *Панфилов Д.Ф.* Экспериментальные исследования грузоподъемности ледяного покрова // Изв. ВНИИГ. 1960. Т. 64. С. 101–115.
8. *Тимошенко С.П.* Пластинки и оболочки. Москва : Наука, 1966. 632 с.

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