

УДК 629.124.791

DOI: 10.46960/2782-5477_2023_2_50

А.Г. Ларин, Н.В. Калинина, Е.М. Грамузов, Е.М. Ларина
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУДОВ СО ЛЬДОМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Экспериментально исследовано ледовое сопротивление ледоколов; представлена методика проведения эксперимента. Показаны результаты пересчета модельных испытаний на натуру, проведено сравнение с имеющимися данными по натурным судам.

Ключевые слова: модельный лед, битый лед, ледовое сопротивление, теория моделирования, ледовый бассейн.

Введение

В настоящий момент развитие ледокольного флота идет быстрыми темпами. Это обусловлено принятием плана развития Северного морского пути (СМП) и увеличением числа транспортных судов ледового плавания. Для проводки таких судов по СМП будут использоваться ледоколы. Помимо этого, на некоторых участках возможно самостоятельное плавание данных судов при достаточной ледовой категории. Поэтому задача изучения взаимодействия судов со льдом остается актуальной: знание ледового сопротивления позволит правильно подобрать мощность силовой установки и движителей.

Ледовое сопротивление можно оценить по математическим формулам или из модельного эксперимента. Процесс взаимодействия судов со льдом носит сложный характер [1-4]. Его изучение связано с определенными трудностями: физико-механические и структурные состояния льда весьма разнообразны, а его свойства зависят от истории образования, температуры окружающей среды, солености воды и пр. Поэтому модельный эксперимент является наиболее достоверным способом определения усилий взаимодействия судна со льдом.

Для моделирования в ледовом бассейне требуется решить задачи разработки: метода моделирования, модели лабораторного льда, методики модельного эксперимента [5]. Метод моделирования заключается в создании теоретических основ для модельного эксперимента – формировании критериев подобия и получение формул пересчета. Разработка модели лабораторного льда состоит в создании состава и технологии приготовления льда, который соответствует предложенным требованиям метода моделирования.

Методы моделирования взаимодействия судов со льдом

Классическая теория моделирования движения судна в ледяном покрове была впервые предложена Л.М. Ногидом [6]. При моделировании необходимо обеспечить геометрическое, кинематическое и динамическое подобие. Условия моделирования выглядят следующим образом:

$$\frac{h_H}{h_M} = \frac{\sigma_H}{\sigma_M} = \frac{E_H}{E_M} = \lambda; \rho_H = \rho_M; \mu_H = \mu_M; \frac{v_H}{v_M} = \sqrt{\lambda}; f_{TP}^H = f_{TP}^M; \frac{P_H}{P_M} = \lambda^3, \quad (1)$$

где $\lambda = L_H / L_M$ – геометрический масштаб модели.

L_H, L_M – характерный линейный размер натуре и модели соответственно.

P_H, P_M – усилие натуре и модели соответственно.

h_H, σ_H, E_H – толщина льда, предел прочности льда на изгиб и модуль упругости натурального льда соответственно.

h_M, σ_M, E_M – толщина льда, предел прочности льда на изгиб и модуль упругости модельного льда соответственно.

ρ_H, ρ_M – плотность натурального и модельного льдов соответственно.

μ_H, μ_M – коэффициент Пуассона натурального и модельного льдов соответственно.

При моделировании ледяного покрова согласно данной теории моделирования основную трудность составляет выполнение условия $\frac{h_H}{h_M} = \frac{\sigma_H}{\sigma_M} = \frac{E_H}{E_M} = \lambda$. Это объясняется тем, что

модельный лед меньшей толщины обладает большей прочностью, чем натуральный лед. Можно сделать вывод, что классическая теория моделирования предъявляет жесткие требования к свойствам модельного льда. Требуется специально смоделированная структура модельного льда, которая будет удовлетворять данному условию. Подобный модельный лед бывает различной структуры и в разных ледовых бассейнах изготавливается по разным технологиям, требуя серьезных материальных затрат.

На кафедре «Кораблестроение и авиационная техника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева был разработан иной метод моделирования, получивший название метода Зуева-Грамузова [5, 7, 8]. Данный метод моделирования не противопоставляется более строгому методу, основанному на подборе материала модели льда. Однако он позволяет расширить объемы модельных исследований, используя для них открытые бассейны и естественные водоемы, а также производить испытания крупномасштабных и полунатурных моделей. Данный метод обладает большой производительностью и требует относительно низких затрат.

Идея метода заключается в компенсации повышенной прочности модельного пресноводного льда меньшей толщиной льда. При этом соблюдается геометрическое подобие картин разрушения льда в плане, при выполнении которого число и расположение точек контакта льда с корпусом при движении модели будет соответствовать натуре. Кроме того, моделируется работа разрушения натурального и модельного льда. Многолетний опыт работы авторов в ледовом бассейне НГТУ показал на возможность такого подхода.

Условия моделирования выглядят следующим образом:

$$h_H = \lambda^{4/3} \cdot \lambda_E^{-1/3} \cdot h_M \quad ; \quad P_H = \lambda^3 \cdot P_M \quad ; \quad v_H = \sqrt{\lambda} \cdot v_M \quad (2)$$

где $\lambda_E = \frac{E_H}{E_M}$ – масштаб модулей упругости,

v_H, v_M – скорость деформирования натурального и модельного ледяного покрова,

P_H, P_M – проломная нагрузка для натурального и модельного льда.

Данный метод моделирования использовался для определения ледового сопротивления целого ряда ледоколов. Полученные результаты пересчета модельных экспериментов имеют достаточно хорошую сходимость с результатами натуральных испытаний.

Экспериментальное определение ледового сопротивления

Для дополнительного изучения сопротивления ледоколов, определения его составляющих и уточнения коэффициентов в полуэмпирической формуле расчета сопротивления были проведены испытания моделей ледоколов. В качестве исследуемых судов были выбраны проекты судов (табл. 1). Полученные данные верифицировались с помощью имеющихся данных натуральных испытаний этих судов.

Таблица 1.
Основные характеристики исследуемых судов

| Характеристики | Размерность | Номер проекта | | | | |
|---|-------------|---|--|-------------------|------------------------|------------------------------------|
| | | P-47 | 16 | 1105 | 1191 | 21900 |
| Класс судна | | «✳ О2,0 (лед 20)» | «✳ О2,0 (ледокол)» | «✳ ЭМ2 (ледокол)» | «✳ М-ПР 2,5 (ледокол)» | КМ ☉ Icebreaker6 |
| Длина судна по КВЛ $L_{КВЛ}$ | м | 27,0 | 44,7 | 71,0 | 73,0 | 114,0 |
| Ширина судна по КВЛ B | м | 7,7 | 11,4 | 16,0 | 16,0 | 28,02 |
| Высота борта H | м | 3,0 | 4,0 | 4,8 | 4,6 | 12,4 |
| Осадка T_{max} | м | 1,98 | 2,72 | 3,5 | 2,5 | 8,5 |
| Водоизмещение D | т | 216 | 777 | 2472 | 2180 | 14300 |
| Тяга на швартовах | кН | 66,2 | 110 | 414 | 410 | 1600 |
| Скорость судна на чистой воде v | | 18,3 км/ч | 18,0 км/ч | 25,7 км/ч | 25 км/ч | 16 уз. |
| Скорость в ледовых условиях | | 3км/ч - при работе раскачивающей установки (P47A) и толщине льда 33см | 8,0 км/ч – (при 12-15см) 6,5 км/ч – (при 15-25см) 4,0 км/ч – (при 25-35см) 1,5 км/ч – (при 35-40см) | 3 км/ч | 1,8 км/ч | 3,0уз на 1,0м льду+20см снега |
| Предельная толщина преодолеваемого льда | см | 33 | 35-40 | 70 +30см снега | 70 | 100 при движении непрерывным ходом |

Для описанных проектов ледоколов были изготовлены модели в различных масштабах. Характеристики моделей ледоколов приведены в табл. 2, их внешний вид представлен на рис. 1-7.

Таблица 2.
Характеристики моделей ледоколов

| Характеристики | Размерность | Номер проекта | | | | | |
|--|-------------|---------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------|
| | | P-47 | 16 | 1105 | 1191 | 2190 | |
| Масштаб модели | | 1:30 | 1:35 | 1:50 | 1:50 | 1:75 | 1:100 |
| Длина модели по КВЛ $L_{КВЛ}$ | м | 0,90 | 1,28 | 1,42 | 1,46 | 1,52 | 1,14 |
| Ширина модели по КВЛ B | м | 0,26 | 0,33 | 0,32 | 0,32 | 0,37 | 0,28 |
| Высота борта модели H | м | 0,10 | 0,11 | 0,10 | 0,09 | 0,17 | 0,12 |
| Осадка модели T_{max} | м | 0,066 | 0,078 | 0,070 | 0,050 | 0,113 | 0,085 |
| Масса модели | кг | 8,0 | 18,1 | 19,8 | 17,4 | 33,9 | 14,3 |
| Скорость модели судна на глубокой тихой воде | м/с | 0,93 | 0,85 | 0,98 | 0,98 | 0,95 | 0,82 |
| Скорость модели в предельном льду | м/с | 0,15 | 0,07 | 0,12 | 0,07 | 0,18 | 0,15 |



Рис. 1. Модель ледокола проекта 16



Рис. 2. Модель ледокола проекта P-47



Рис. 3. Модель ледокола проекта 1105



Рис. 4. Модель ледокола проекта 1191



Рис. 5. Модель ледокола проекта 21900



Рис. 6. Модели ледоколов проектов 16, P-47, 1105, 1191



Рис. 7. Модели ледокола проекта 21900 в разных масштабах

Испытания проводились в ледовом бассейне НГТУ. Чаша бассейна имеет длину 15,6 м, ширину 1,6 м, глубину 0,85 м. Для проведения испытаний используется гравитационная буксировочная система. Способ запряжки модели допускает свободные вертикальные перемещения модели при ее движении вдоль бассейна. Скорость движения модели определяется фотоимпульсным способом – через отверстия в диске ведущего шкива буксировочной системы (рис. 8). Сигнал с фотодиода регистрируется частотомером, специально спроектированным и изготовленным для ледового бассейна. Сопротивление измеряется количеством разновесов через приводной барабан.



Рис. 8. Ведущий шкив и частотомер для измерения скорости

Схема буксировочной системы приведена на рис. 9. Испытания проводились в модели битого льда, а в холодное время года – в сплошном естественном льду.

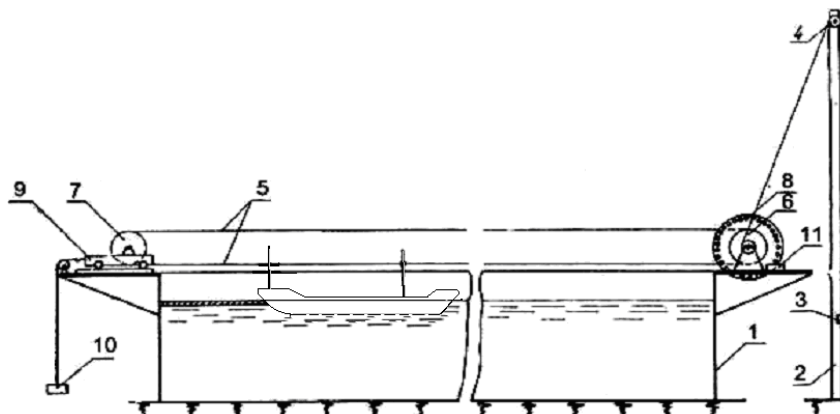


Рис. 9. Схема гравитационной буксировочной системы ледового бассейна НГТУ:

1 – бассейн, 2 – мачта, 3 – буксировочный груз, 4 – направляющий блок, 5 – бесконечный трос, 6 – ведущий шкив, 7 – ведомый шкив, 8 – диск с отверстиями, 9 – тележка устройства натяжения, 10 – груз натяжения, 11 – датчик скорости

Сплошной лед моделировался естественным тонким пресноводным льдом, намораживаемым в водоеме или в бассейне при отрицательных температурах воздуха. Модель естественного сплошного пресноводного льда представлена на рис. 10. При пересчете сопротивления разрушения льда возникает масштабный эффект, связанный с тем, что при моделировании не учтены смятие и дробление кромки в местах контакта. Однако есть основание полагать, что этот эффект невелик. Равенство коэффициентов трения $f_n = f_m$ корпуса судна и модели о естественный и моделируемый лед можно обеспечить специальным покрытием модели. Чтобы избежать масштабного эффекта, связанного с несоответствием толщины льда и составляющей сопротивления обломков, необходимо экспериментальное разделение составляющих сопротивления (аналогично разделению сопротивления трения и остаточного при

экспериментальном определении сопротивления воды). Для этого, помимо испытаний в сплошном льду, проводятся испытания в битом льду десятибалльной сплоченности при толщине, в которой проводились испытания в сплошном льду. Затем определяются кривые сопротивления в ряде толщин льда.

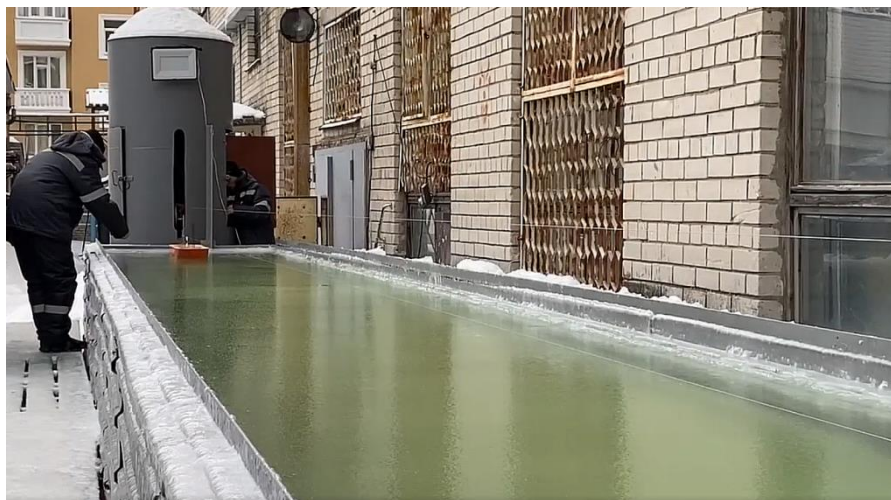


Рис. 10. Модель сплошного естественного льда в ледовом бассейне НГТУ

$$R_{1M} = R_M - R_{2M} = f(h, v), \quad (3)$$

Пересчет на натуру для составляющих ведется раздельно.

$$R_{1M}(v) = R_M(v) - R_{2M}(v), \text{ при } h = \text{пост}, \quad (4)$$

$$R_{1H} = \lambda^3 R_{1M},$$

$$h_H = \lambda^{4/3} \cdot \lambda_E^{-1/3} \cdot h_M, \quad (5)$$

$$v_H = \sqrt{\lambda} v_M.$$

$$R_{2H} = \lambda^3 R_{2M},$$

$$h_H = \lambda \cdot h_M, \quad (6)$$

$$v_H = \sqrt{\lambda} v_M.$$

Сопротивление воды R_v может быть выделено из R_M и пересчитано традиционными способами при испытании модели судна в чистой воде. Но, как правило, необходимости в этом нет из-за его малости, а пересчет можно вести совместно с ледовым сопротивлением по кубу масштаба. Как показали эксперименты, можно проводить испытания по упрощенной методике не разделяя составляющие. При этом по (5) можно проводить определение полного сопротивления. Несоответствие толщин $h_H/h_M \neq \lambda$ приведет к некоторому уменьшению статической составляющей, связанной с притапливанием льдин, которая невелика. В результате испытаний моделей ледоколов были получены кривые сопротивления для моделей проектов 21900, 1105, 1191, 16. Полученные результаты были пересчитаны на натуру по упрощенной методике по формулам (5). На момент пересчета испытания в битом льду еще не были полностью проведены. Также были построены кривые ледопроеходимости и произведено сравнение с натурными данными. Полученные кривые ледопроеходимости для натурального судна представлены на рис. 11-14.

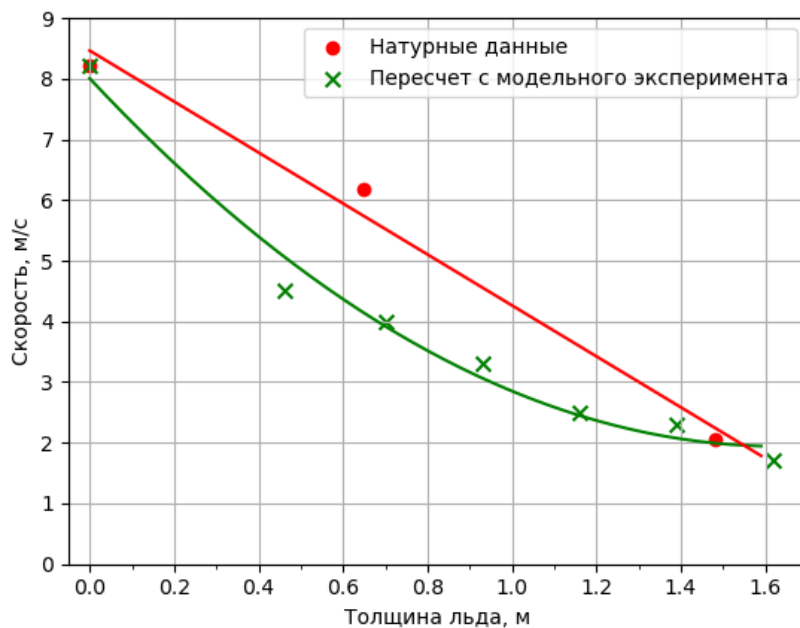


Рис. 11. Диаграмма ледопроеходимости ледокола проекта 21900

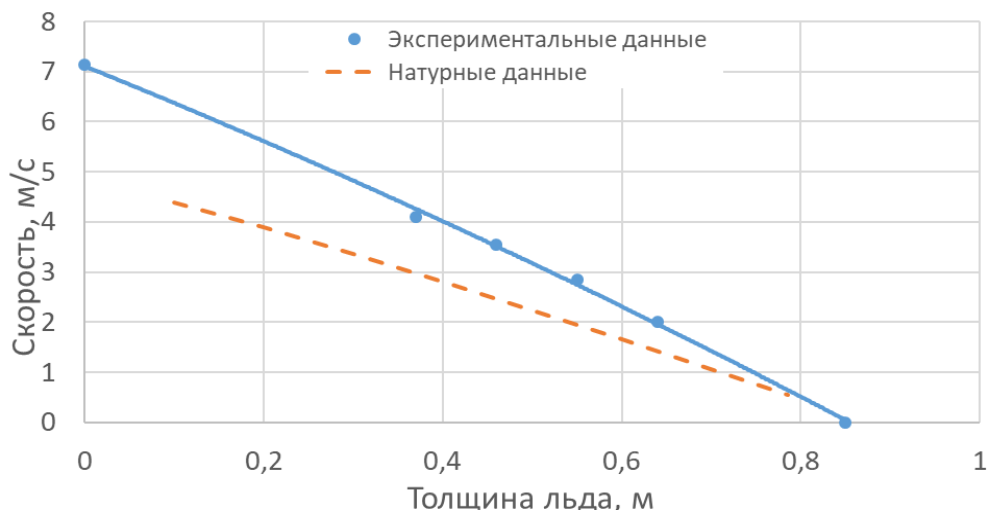


Рис. 12. Диаграмма ледопроеходимости ледокола проекта 1105

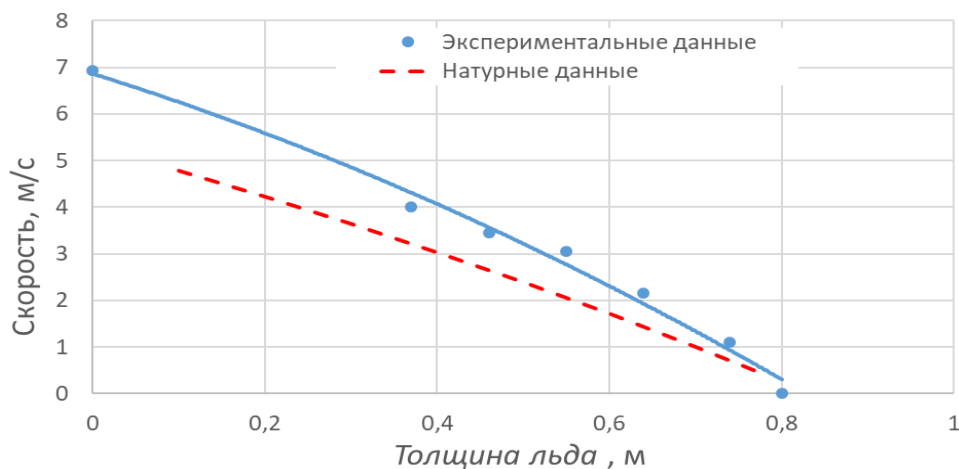


Рис. 13. Диаграмма ледопроеходимости ледокола проекта 1191

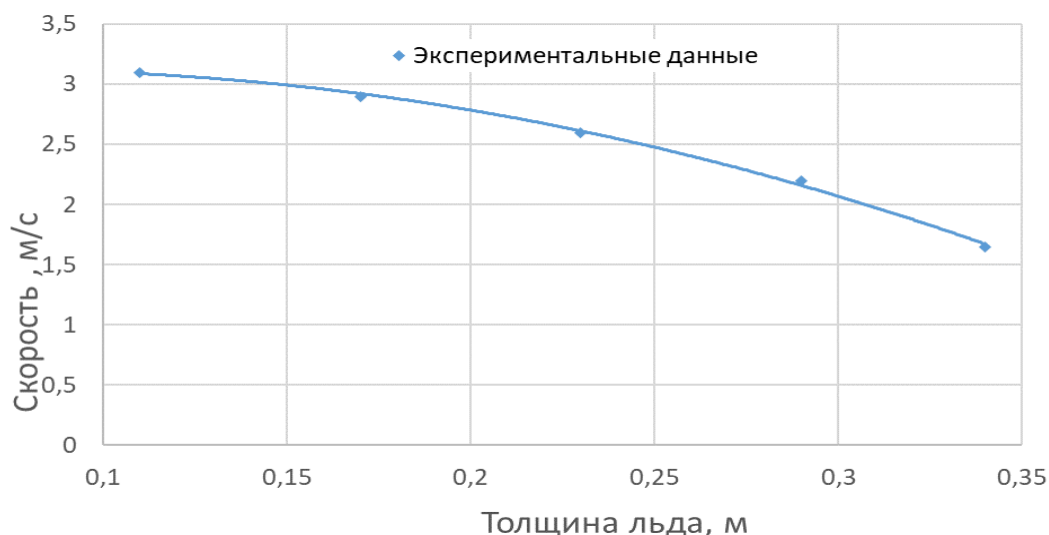


Рис. 14. Диаграмма ледопроеходимости ледокола проекта 16

Как видно из полученных графиков, при движении в предельных льдах пересчет по упрощенной методике дает удовлетворительную точность. В более тонких льдах, когда скорость возрастает, погрешность увеличивается. Для данных толщин расчет должен выполняться по полной методике с разделением на сопротивление ломки и сопротивление взаимодействия с обломками. Следует ожидать увеличения сопротивления при больших скоростях движения из-за роста инерционной составляющей. Это приведет к снижению достижимой скорости в тонких льдах, и кривая ледопроеходимости ляжет ближе к натурным данным.

Испытания моделей судна в битом льду проводятся в плитках полиэтилена высокого давления, имеющих в плане форму прямоугольных треугольников, а толщину, соответствующую масштабу модели судна. Испытания проводились в плитках 10 x 60 x 60 мм и 20 x 100 x 100 мм. Модель битого льда представлена на рис. 15.



Рис. 15. Бассейн с битым (моделированным) льдом в виде треугольных плиток полиэтилена

После проведения испытаний в битом льду были получены кривые сопротивления моделей ледоколов; пример такой кривой представлен на рис. 16. После окончательной обработки результатов будут получены кривые сопротивления моделей ледоколов в сплошном льду. Полученные графики можно использовать для уточнения коэффициентов k_j , входящих в полуэмпирическую формулу Е.М. Грамузова для определения сопротивления. Модели, для которых производились испытания, имеют различные обводы и форму корпуса. Это позволит определить значения коэффициентов k_j для судов различной формы, а также установить наличие такого влияния.

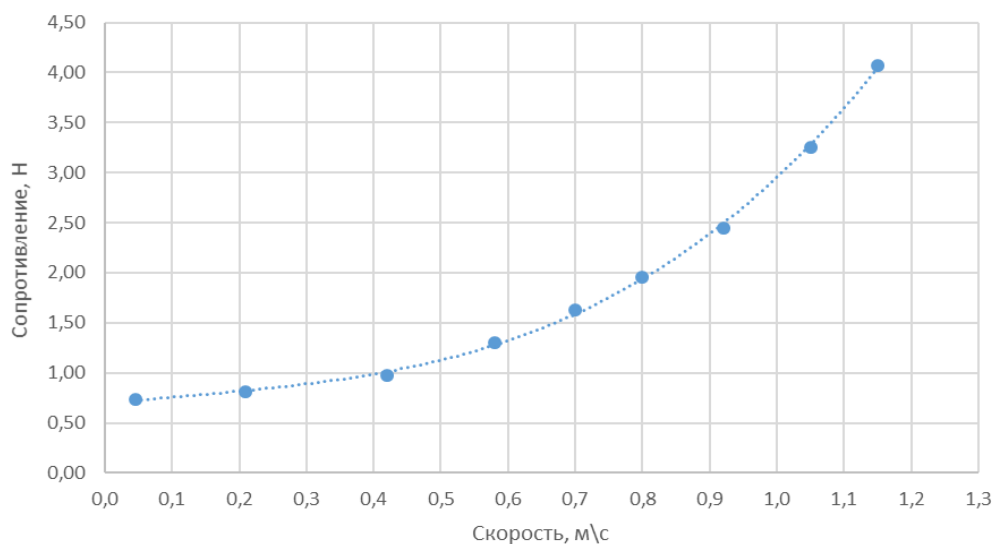


Рис. 16. Кривая сопротивления в битом льду модели ледокола проекта 21900 (размер треугольной плитки 10 x 60 x 60 мм, сплоченность 10 баллов)

Заключение

Показано, что для моделирования взаимодействия судов со льдом можно применять модель естественного тонкого пресноводного льда. Для проведения экспериментов могут использоваться ледовые бассейны с искусственным или естественным намораживанием льда, а также естественные водоемы. Использование бассейнов с естественным намораживанием позволяет существенно снизить себестоимость проведения эксперимента.

Пересчет результатов модельных испытаний на натуре по упрощенной методике дает хорошую сходимость с натурными данными при движении судна в предельных льдах. При высоких скоростях, когда влияние обломков льда заметно, необходимо проводить пересчет по полной методике с разделением составляющих сопротивления.

Представленные исследования выполнены в рамках гранта РНФ по проекту № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом».

Библиографический список

1. **Алексеев, Ю.Н.** Оценка составляющей полного ледового сопротивления, зависящей от разрушения льда / Ю.Н. Алексеев, К.Е. Сазонов, Л.М. Шахаева // Вопросы судостроения. Серия: Проектирование судов. 1982. № 32. С. 69-73.
2. **Грамузов, Е.М.** Теоретическая модель сопротивления разрушения льда при движении ледокола в ровном сплошном ледяном поле / Е.М. Грамузов, Н.В. Калинина, А.А. Куркин // Экологические системы и приборы. 2022. № 10. С.25-35.

3. **Грамузов, Е.М.** Теоретическая модель сопротивления обломков льда при движении ледокола в ровном сплошном ледяном поле / Е.М. Грамузов, Н.В. Калинина, А.А. Куркин // Экологические системы и приборы. 2022. № 10. С.59-66.
4. **Грамузов, Е.М.** Физическое моделирование сопротивления сплошного льда движению судов / Е.М. Грамузов, Н.В. Калинина, А.А. Куркин // Экологические системы и приборы № 12. 2022. С 82-89.
5. **Ионов, Б.П.** Ледовая ходкость судов: Монография / Б.П. Ионов, Е.Н. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.
6. **Каштелян, В.И.** Сопротивление льда движению судна / В.И. Каштелян, И.И. Позняк, А.Я. Рывлин. – Л.: Судостроение, 1968. – 238 с.
7. **Зуев, В.А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях. – Л.: Судостроение, 1986. – 206 с.
8. **Зуев, В.А.** Новые подходы к моделированию ледовой среды при модельных испытаниях судов / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов // Полярная механика. 2016. № 3. С. 31-42.