

УДК. 629.5.015.2

Д.А. Семенов, В.А. Зуев

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ВОДЫ И ЛЬДА
НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СУДОВ В БИТЫХ ЛЬДАХ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Определение ледовых качеств судов в процессе их проектирования заставляет обращаться к модельному эксперименту. Моделирование осуществляется в ледовом бассейне с последующим пересчетом результатов на натуру по определенным методикам. Поэтому представляет интерес поиск новых материалов, более полно удовлетворяющих условиям подобия, и разработка методик пересчета результатов испытаний на натуру при частичном подобии.

Методология: Рассмотрен метод моделирования солености воды и льда при модельных испытаниях судов в битых льдах. Соленость рассматривается как основной фактор изменяющий плотность воды и льда, а следовательно, и сопротивление судна в битом льду.

Результаты: Представлены результаты модельных испытаний судна пр. 1105 и пр. 22450 в пресной и соленой воде. Теоретическим и экспериментальным путем доказано, как соленость влияет на сопротивление судна в битых льдах. Предложены новые расчетные формулы для пересчета ледового сопротивления модели в пресной воде на соленую.

Значения исследования: Анализ полученных данных позволил экспериментально подтвердить и обосновать метод пересчета результатов модельных испытаний в пресной воде на натурное судно, плавающее в соленой воде.

Новизна/ценность: На базе полученных формул разработана методика определения ледового сопротивления морских судов путем проведения модельных испытаний в битых льдах в опытовых бассейнах.

Ключевые слова: ледовые условия, ледовое сопротивление, битые льды, судно, соленость, пересчет с модели на натуру, модельные испытания, моделирование.

При моделировании ледового сопротивления важно соблюдать подобие в отношении плотности льда и его модели, плотности воды и ее модели. Влияние плотности битого льда на сопротивление исследовал М.Е. Рабинович [11]. Влиянию плотности воды на сопротивление судов в битых льдах не всегда уделяли должное внимание.

Плотность морского льда зависит от его температуры, солености, возраста, условий образования и т.д. и составляет $0,86-0,94 \text{ т/м}^3$. Плотность морской воды зависит от ее солености, температуры и глубины. Средние значения солености воды вдоль Арктического побережья составляют 30–35 ‰. Значения плотности поверхностного слоя воды при температуре $0 \text{ }^\circ\text{C}$ можно принять $1,025 \text{ т/м}^3$ [1, 2].

Морская вода имеет большую плотность, а морской лед – меньшую плотность. Большое количество авторов игнорировали эти факты, что приводило к неточностям при прогнозировании сопротивления во льдах.

Повышение плотности морской воды и понижение плотности соленого льда сказывается на плавучести льдин, а следовательно, на составляющих сопротивления льдин о корпус судна.

При движении судна в битых льдах большое значение играют силы трения. Рассмотрим эти силы: так называемое сухое трение и гидродинамическое. Сухое трение возникает при взаимодействии корпуса судна со льдом и льдин между собой. Величина сил сухого трения не зависит от скорости скольжения и пропорциональна соответствующим контактным давлениям. Силы гидродинамического трения появляются при обтекании водой корпуса судна и льдин, а также при их раздвигании, притапливании и поворачивании. Обусловленные вязкостью воды, они зависят от скорости движения.

Сухое трение льда относится к категории сил внешнего трения; для него справедлив закон Кулона—Амонтона. Силы сухого трения при моделировании подчиняются условию подобия Фруда, являются автомодельными при соблюдении равенства коэффициентов трения природы и модели.

Гидродинамическое трение относится к категории сил внутреннего трения, так как скольжение в этом случае происходит внутри жидкости между ее слоями. Эти силы зависят от вязкости жидкости и скорости движения.

При достаточно больших удельных давлениях, характерных для движения судна во льдах, гидродинамическое трение льда о корпуса судна также можно рассматривать как не зависящее от скорости [9]. Опытами, поставленными в натуральных условиях, было доказано, что трение льда о судовую сталь и льда о лед как при отсутствии жидкой смазки (воды) между трущимися поверхностями, так и в воде подчиняется законам граничного трения (трения при наличии тонкой смазочной прослойки), к которым применим закон Кулона—Амонтона. Указанный вывод распространяется практически на весь диапазон удельных давлений и скоростей скольжения, встречающихся при движении судна во льдах [10,11].

На основании сказанного полагается, что большая часть контактных сил трения, возникающих при взаимодействии корпуса со льдом и льдин между собой, может быть отнесена к категории сил, моделирующихся согласно условию подобия Фруда.

Силы трения включают вязкостное сопротивление корпуса судна и трение льдин о воду. Вязкостное сопротивление корпуса судна может не приниматься во внимание, когда речь идет о чистом ледовом сопротивлении. Вязкостное сопротивление льдин состоит из сопротивления трения и сопротивления формы (вихревого сопротивления). Первая из составляющих может моделироваться лишь по условию Рейнольдса, вторая является частью составляющей гидродинамического давления, возникающего вследствие перераспределения давления, вызванного влиянием вязкости жидкости. Для удобообтекаемых тел с большим удлинением эта составляющая пересчитывается на натуру с так называемым остаточным сопротивлением, согласно условию подобия Фруда. Однако обломки льдин следует отнести к плохо обтекаемым телам. Скорости их перемещения сравнительно невелики, поэтому коэффициент сопротивления зависит от числа Рейнольдса. Следовательно, силы, обуславливающие сопротивление формы льдин, не моделируются по условию Фруда.

При моделировании движения судна в битых льдах полное сопротивление можно представить так:

$$R = R_{\text{л}} + R_{\text{в}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{л}}$ – чисто ледовое сопротивление; $R_{\text{в}}$ – сопротивление воды.

Анализ природы действующих на судно сил трения позволил установить, что для моделирования движения в битых льдах необходимо ледовое сопротивление разделить на составляющие рис. 1: прямое (не зависящее от скорости) и скоростное (зависящее от скорости), которые могут определяться отдельно [3, 5].

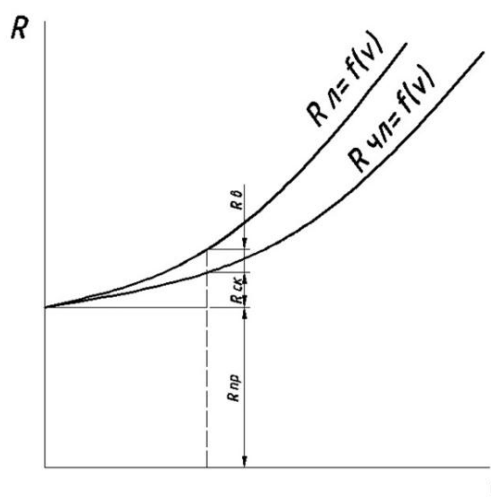


Рис. 1. Составляющие ледового сопротивления:

$R_{\text{пр}}$ - прямое сопротивление; $R_{\text{ск}}$ - скоростное сопротивление; $R_{\text{в}}$ - сопротивление в чистой воде;
 $R_{\text{л}}$ - полное ледовое сопротивление, $R_{\text{чл}}$ - чисто ледовое сопротивление

В обобщенном виде сопротивление битого льда с точки зрения анализа влияния плотностей можно представить следующим выражением:

$$R = (\rho_{\text{л}} - \rho_{\text{в}})F_1 + \rho_{\text{в}}v^2F_2 + \rho_{\text{л}}v^2F_3, \quad (2)$$

где F_1, F_2, F_3 – функции, зависящие от формы корпуса судна, коэффициента трения корпуса о лед и толщины льда (Функции F_1, F_2 и F_3 подробно описаны в книге Ионова Б. П и Грамузова Е. М. «Ледовая ходкость судов» [9]); v – скорость движения судна.

Существующие методики расчета чистого ледового сопротивления противоречат друг другу в количественном, а иногда и качественном плане, и часто не дают удовлетворительного с точки зрения потребностей практики ответа. В этой связи актуальными остаются экспериментальные методы определения ледового сопротивления.

Для экспериментального определения сопротивления судна в битом льду было предложено разделить его на составляющие. При разделении сопротивления на составляющие принята гипотеза независимости отдельных составляющих полного ледового сопротивления. При таком разделении каждую составляющую можно определить модельными испытаниями и пересчитать на натурное судно [6,7,8].

Из формулы (2) видно, что прямое сопротивление пропорционально разности плотностей воды и льда ($\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{л}}$). Со скоростным сопротивлением все сложнее. Его нельзя экспериментально разделить на инерционное и гидродинамическое. Инерционное сопротивление пропорционально плотности льда, а гидродинамическое – плотности воды. Учитывая большую определенность плотности воды, по аналогии с гипотезой Фруда для остаточного сопротивления, предполагается (для получения более достоверных данных), что скоростное сопротивление пропорционально плотности воды.

В соответствии с классической теорией моделирования, необходимо соблюсти геометрическое, кинематическое и динамическое подобие явлений, сопровождающих разрушение льда корпусом судна.

Таблица 1

Условия моделирования при испытаниях судов в битых льдах

| Параметр | Судно | | Параметр | Лед | |
|--|--------|------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Натура | Модель | | Натура | Модель |
| Длина | L_n | $L_n \cdot 1/\lambda$ | Толщина | h_n | $h_n \cdot 1/\lambda$ |
| Ширина | B_n | $B_n \cdot 1/\lambda$ | Протяженность | r_n | $r_n \cdot 1/\lambda$ |
| Осадка | T_n | $T_n \cdot 1/\lambda$ | Коеф. трения | f_n | f_m |
| Водоизмещение | V_n | $V_n \cdot 1/\lambda^3$ | Массовая плотность воды | $(\rho_{\text{в}})_n$ | $(\rho_{\text{в}})_m$ |
| Скорость хода | v_n | $v_n \cdot 1/\sqrt{\lambda}$ | | | |
| Время | t_n | $t_n \cdot 1/\sqrt{\lambda}$ | Массовая плотность льда | $(\rho_{\text{л}})_n$ | $(\rho_{\text{л}})_m$ |
| Ускорение силы тяжести | g_n | g_m | | | |
| Сопротивление движению | R_n | $R_n \cdot 1/\lambda^3$ | Соленость | s_n | s_m |
| Работа сил | A_n | $R_n \cdot 1/\lambda^4$ | Сплоченность льда | S_n | S_m |
| $\lambda = L_n/L_m$ - линейный масштаб моделирования | | | | | |

Для каждой пары действующих сил можно написать свое условие подобия (табл. 1), которое называется условием частичного подобия. В случае выполнения всех частичных подобий имеет место полное динамическое подобие.

При выполнении представленных условий ледовое сопротивление натурального судна при движении в битых льдах можно определить пересчетом в соответствии с законом подобия Фруда по кубу масштаба λ^3 . Геометрические характеристики льдин и канала определяются масштабом геометрического подобия.

Принимая во внимание изложенное, можно записать формулы для прямого и скоростного сопротивлений с учетом плотностей воды и льда [6, 7, 8]. В этом случае прямое сопротивление обломков льда при пересчете с пресной воды на соленую можно пересчитать по формуле:

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

где индексами «н» и «м» обозначены натура и модель, а индексами «п» и «с» пресный и соленый лед.

Скоростное сопротивление обломков можно определить следующим образом:

$$R_{\text{ск}}^{\text{н}} = R_{\text{ск}}^{\text{м}} \frac{\rho_{\text{в}}^{\text{с}}}{\rho_{\text{в}}^{\text{п}}} \lambda^3, \quad (4)$$

где λ – геометрический масштаб.

Для оценки влияния плотности воды и льда рассмотрим движение по поверхности воды, покрытой битым льдом, сплоченностью 10 баллов, плоской пластины, размерами $L \times B \times H$; L, B, H – длина, ширина и высота пластины соответственно, M – масса пластины, плотность воды – $\rho_{\text{в}}$, льда – $\rho_{\text{л}}$; давление льдин на пластину $(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{л}})gh_{\text{л}}$ ($h_{\text{л}}$ – толщина льда).

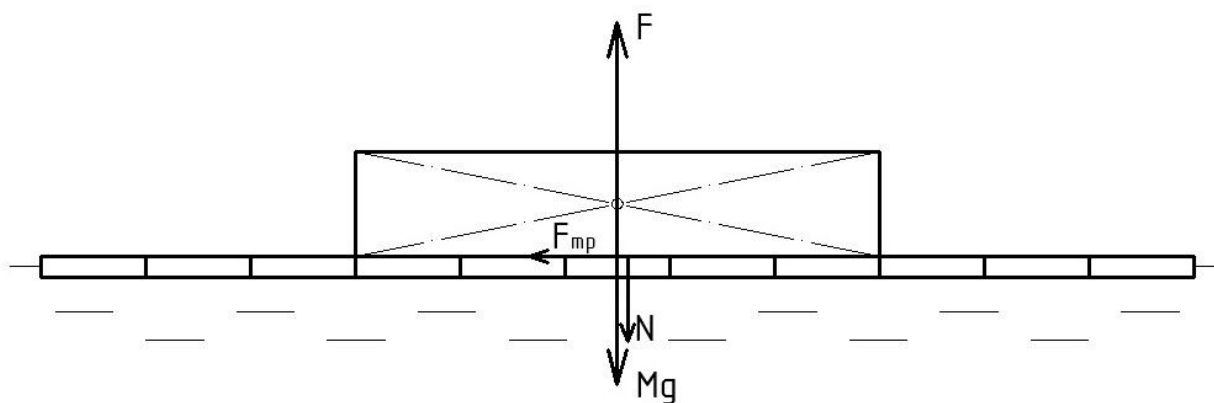


Рис. 2. Силы, возникающие при движении по поверхности воды, покрытой битым льдом, сплоченностью 10 баллов, плоской пластины

Суммарная сила со стороны льда на пластину

$$N = (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{л}})gh_{\text{л}}S, \quad (5)$$

где S – площадь пластины в плане.

В соответствии с законом Кулона – Амонтонна, сила трения битого льда о поверхность пластины

$$F_{\text{тр}} = fN, \quad (6)$$

где f – коэффициент трения пары лед – пластина.

Из формул (5) и (6) видно, что сила трения битого льда о поверхность пластины зависит от соотношения плотности воды и льда.

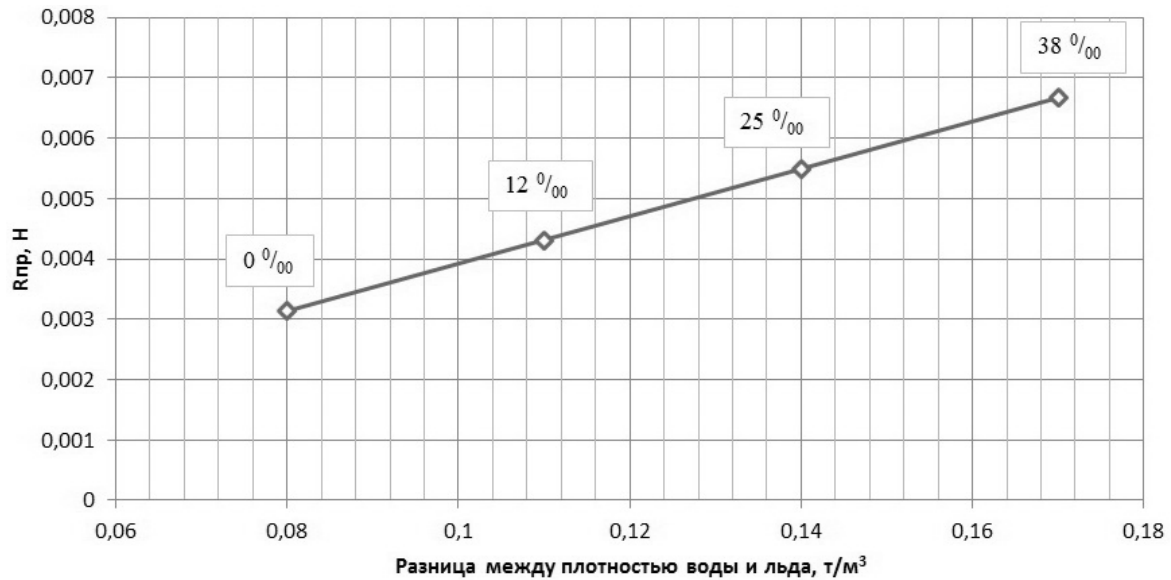


Рис. 3. Определение зависимости прямого сопротивления от изменения разницы между плотностью воды и льда (для разной солености)

При плотностях морской воды и льда $1,025 \text{ т/м}^3$, $0,89 \text{ т/м}^3$ и пресноводных $1,000 \text{ т/м}^3$, $0,92 \text{ т/м}^3$ эта разница равна $0,135 \text{ т/м}^3$ и $0,080 \text{ т/м}^3$ соответственно. То есть сопротивление трения при пересчете на морской лед необходимо увеличивать в 1,7 раза. Трение играет большую роль в прогнозировании ледового сопротивления судов в битых льдах, поэтому для получения более достоверных данных необходимо учитывать соленость воды и льда, так как она в значительной степени влияет на плотность, а следовательно, и на ледовое сопротивление в целом. Также на это указывают модельные испытания судов в битом льду, проводимые в ледовом бассейне НГТУ им. Р.Е. Алексева.



Рис. 4. Внешний вид ледового бассейна НГТУ им. Р. Е. Алексева после модернизации в 2010 г.

Покажем, насколько адекватны теоретические зависимости (3) и (4), предложенные и обоснованные выше. Модельные испытания в битом льду разной толщины, сплоченности

при разной солености воды были проведены для судов ледового плавания, характеристики которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики моделей

| Характеристики | пр.22450 | пр. 1105 | пр. 16 | пр. Р-47 |
|--------------------------|----------|----------|--------|----------|
| Масштаб λ | 1:60 | 1:50 | 1:33,3 | 1:17,7 |
| Водоизмещение D_M , кг | 30,5 | 17,9 | 17,7 | 38,5 |
| Длина модели L_M , м | 1,271 | 1,42 | 1,341 | 1,525 |
| Ширина модели B_M , м | 0,30 | 0,32 | 0,336 | 0,435 |
| Осадка модели T_M , м | 0,108 | 0,065 | 0,072 | 0,120 |

В качестве примера на рис. 5 приведены результаты пересчета модельных испытаний модели ледокола пр. 1105 «Капитан Чечкин». Модель выполнена в масштабе 1:50, испытывалась в плитках полиэтилена (плотность $0,92\text{т/м}^3$) толщиной 15 мм, сплоченностью 10 баллов в канале шириной 0,6 м. В эксперименте изменялась соленость воды, при этом плотность воды получилась 1.000, 1.011 и 1.023 т/м^3 .

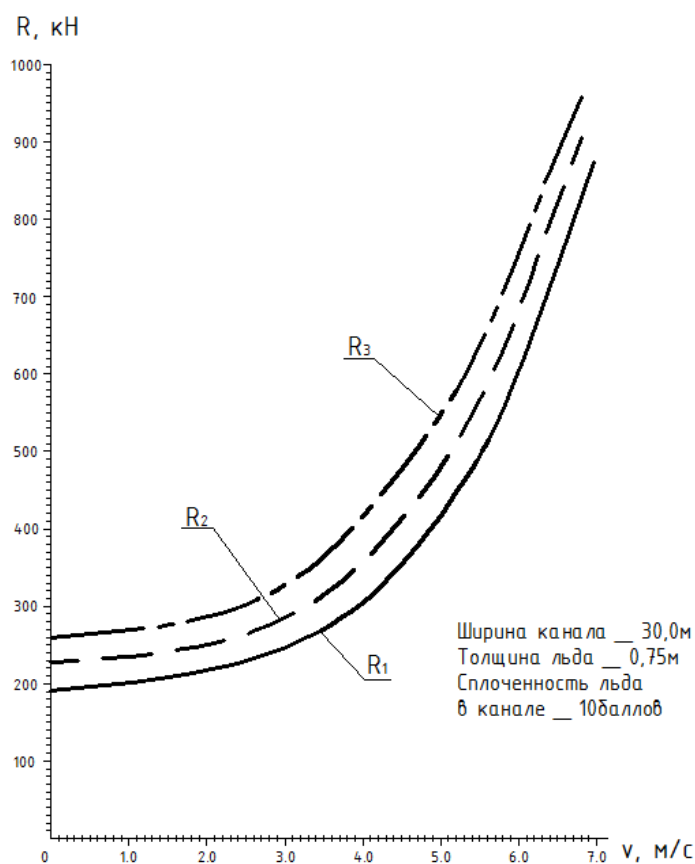


Рис. 5. Полное ледовое сопротивление натурного судна типа "Капитан Чечкин" пр.1105:
 R_1 - пресная вода и пресный лед; R_2 - соленая вода (плотность воды $1,011\text{ т/м}^3$) и пресный лед;
 R_3 - соленая вода (плотность воды $1,023\text{ т/м}^3$) и пресный лед

На рис. 6 показаны результаты пересчета ледового сопротивления судна – снабженца

проекта 22450 ледового класса Arc 5 на натурное судно с использованием поправок (3) и (4). Модель в масштабе 1:60 испытывалась в плитках полиэтилена толщиной 20 мм, сплоченностью 10 баллов в канале шириной 0,48 м.

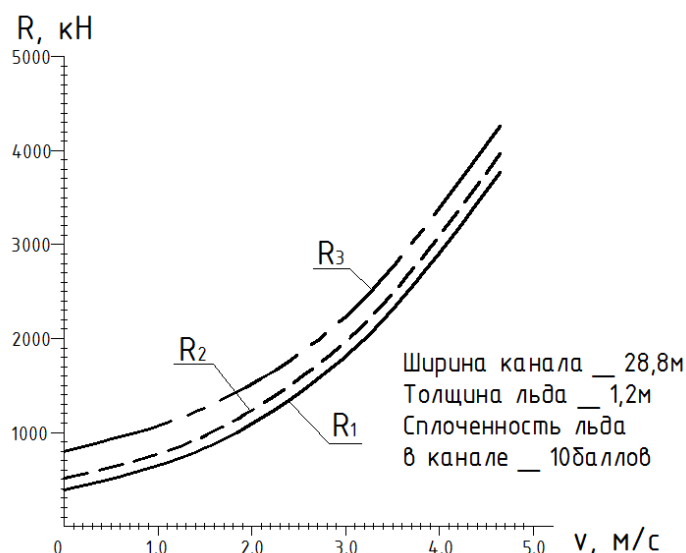


Рис. 6. Полное ледовое сопротивление натурного судна-снабженца пр.22450:
 R_1 - пресная вода и пресный лед ($\rho_{\text{в}}^{\text{н}}=1\text{т/м}^3$, $\rho_{\text{л}}^{\text{н}}=0,92\text{т/м}^3$); R_2 - соленая вода и пресный лед ($\rho_{\text{в}}^{\text{н}}=1,025\text{т/м}^3$, $\rho_{\text{л}}^{\text{н}}=0,92\text{т/м}^3$); R_3 - соленая вода и соленый лед ($\rho_{\text{в}}^{\text{н}}=1\text{т/м}^3$, $\rho_{\text{л}}^{\text{н}}=0,89\text{т/м}^3$)

Приведенные примеры прогнозирования сопротивления морских судов в битом льду с помощью модельных испытаний убедительно показывают необходимость учета поправок на плотность воды и льда с помощью формул (3) и (4).

Предложенный метод пересчета ледового сопротивления в битом льду позволяет, провести испытания в пресной воде и пересчитать на натурное судно, учитывая, что оно эксплуатируется в соленой воде. Это актуально для морских судов, так как возрастание солености приводит к увеличению сопротивления. Если не учитывать поправок на изменение солености при пересчете на натуре в методе, изложенном в РТМ 212.0102-80, то требуется проводить испытания в соленой воде.

Библиографический список

1. Беховых, Л.А. Основы гидрофизики: учеб. пособие / Л.А. Беховых, С.В. Макарычев, И.В. Шорина. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2008. – 172 с.
2. Зуев, В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.
3. Зуев, В.А. Взаимодействие судов со льдом / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов. – Горький: ГПИ, 1988. – 89 с.
4. Зуев, В.А. Разработка практических методов и технологий моделирования ледовой среды при испытаниях судов / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, М.А. Балакшина // 18 Междунар. конф. по портовому и океаническому машиностроению в Арктических условиях. – Потсдам, (шт. Нью-Йорк, США), 2005.
5. Зуев, В.А. Пересчет с модели на натурные условия сопротивления битого льда движению судна / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. Вып. 51 (335).
6. Зуев, В.А. Моделирование взаимодействия судна со льдом / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, Д.А. Семенов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 63 (347). С. 51–58.
7. Зуев, В.А. Влияние внешних условий на сопротивление судов при модельных испытаниях в битом льду / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, Д.А. Семенов // XLIV Крыловские чтения. Проблемы

- мореходных качеств судов, корабельной гидромеханики и освоения шельфа: докл. научно-технич. конф. – СПб., 2011. С. 113–116.
8. **Зуев, В.А.** Моделирование ледового сопротивления судов / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, Д.А. Семенов // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2011. №3 (90). С. 190–195.
 9. **Ионов, Б.П.** Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение. 2001. – 512 с.
 10. Попадание льда под днище судна при плавании в ледовых условиях / В.И. Каштелян [и др.] // Теория прочности и проектирования судов, плавающих во льдах. – Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 1995. С. 37–42.
 11. **Рабинович, М.Е.** О влиянии плотности льда на ледовое сопротивление движению судна // Труды ГПИ им. А.А. Жданова. 1973. Т. 29. Вып. 6.

*Дата поступления
в редакцию 22. 06.2012*

D.A. Semenov, V.A. Zuev

THE INFLUENCE OF CHANGE WATER AND ICE DENSITY ON SHIPS RESISTANCE IN BROKEN ICE

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

Purpose: Determination of ships ice qualities in the engineering process makes handle to model experiment. Modeling in the ice basin, followed by the results recalculation on the full-scale ship of certain methods is carried out. In this connection the new material search are more fully satisfy the similarity condition, and the development of method for test results recalculation on full-scale ship of the partial similarity is of interest.

Methodology: The modeling method of the water and ice salinity in the ship model tests in broken ice is considered. Salinity is regarded as a main factor in changing water and ice density and consequently the ships resistance in broken ice.

Findings: The results of 1105 ship project model tests in sweet and salt water are presented. Theoretical and experimentally proved how salinity influences on ships resistance in the broken ice. The new design equation for the recalculation of model ice resistance in sweet water to salt are suggested.

Implications: The data analysis made it possible to experimentally corroborate and substantiate the method of results recalculation of model tests in sweet water on full-scale ship floating in salt water.

Originality/value: On the obtained formulas basis the determination method of ships ice resistance by means of model tests in the broken ice in the experimental model basin is developed.

Key words: ice conditions, ice resistance, broken ice, vessel, salinity, model test, modeling, recalculated from the model on the nature.