

ДВИЖЕНИЕ СУДОВ ЗАДНИМ ХОДОМ ВО ЛЬДАХ: НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

А. А. Добродеев

Крыловский государственный научный центр (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

К. Е. Сазонов

Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

И. А. Саперштейн

Крыловский государственный научный центр (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 28 июля 2019 г.

Представлены некоторые результаты исследований, выполненных в ледовом опытовом бассейне Крыловского государственного научного центра, а также приведены теоретические оценки, относящиеся к изучению движения судов кормой вперед в сплошных ровных льдах. Выполнен анализ взаимодействия кормовой оконечности судна со сплошным ледяным покровом, приведена оценка влияния частоты вращения гребных винтов при проведении модельных испытаний в ледовом бассейне на ледовое сопротивление судна. Полученные результаты позволяют оценить эффективность морских транспортных систем и могут быть использованы для разработки требований в области ледовой ходкости к проектируемым ледоколам и крупнотоннажным судам ледового плавания.

Ключевые слова: судно ледового плавания, движение задним ходом, суда двойного действия, корма, разрушение льда.

Введение

В последние десятилетия специалисты в области морской ледотехники в качестве одного из возможных сценариев эксплуатации судна во льдах рассматривают движение задним ходом [1—3]. Во многом повышенный интерес к движению судов во льдах задним ходом обусловлен предложенной финскими специалистами концепцией судов двойного действия, в соответствии с которой судно должно преодолевать льды, двигаясь кормой вперед [4]. В основу этой концепции были положены хорошо известные факты увеличения показателей ледовой ходкости судов при движении задним ходом во льдах [5]. Целью данной работы не является анализ концепции судов двойного действия, он выполнен в опубликованных ранее работах авторов [6; 7].

Основной задачей было проведение исследований характера взаимодействия кормовой оконечности судна со сплошным ледяным покровом. Анализ литературных источников показал, что при проведе-

нии расчетов ходкости судов, двигающихся во льдах задним ходом, особенности взаимодействия кормы со льдом не исследовались, а сами эти особенности не учитывались [8]. Расчет движения кормой вперед осуществлялся практически так же, как и при движении передним ходом [9].

Наблюдения, выполненные в ледовом бассейне Крыловского научного центра [10], показывают, что можно выделить по крайней мере две особенности, которые отличают движение кормой вперед от движения носом вперед. Это характер разрушения ледяного покрова кормовой оконечностью и влияние работающей движительной на ледовое сопротивление идущего задним ходом судна. Анализ этих особенностей и посвящена данная работа.

Особенности разрушения льда кормовой оконечностью

У современных ледоколов и судов ледового плавания кормовые оконечности бывают двух типов. Это традиционная корма, приспособленная для размещения обычных движителей на выкружках

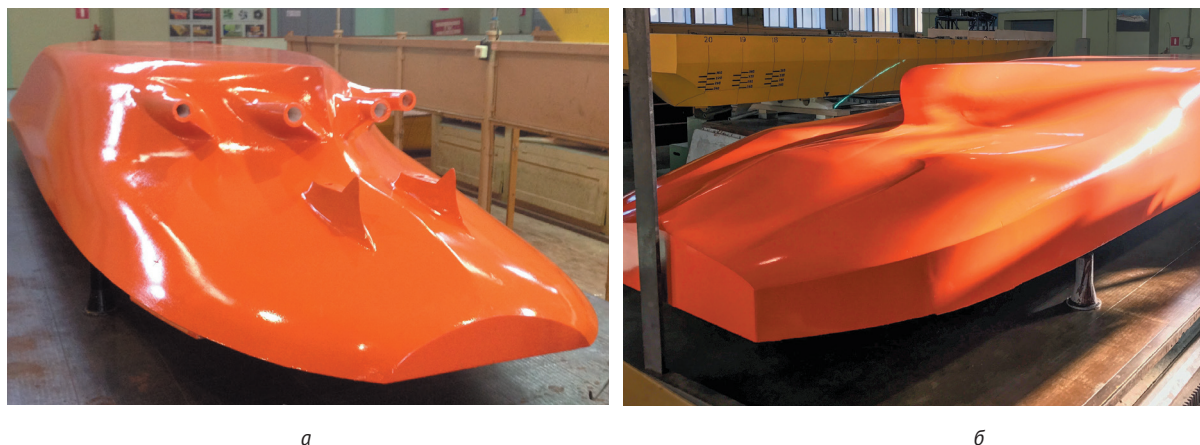


Рис. 1. Традиционная кормовая оконечность ледокола (а) и кормовая оконечность, предназначенная для размещения ВРК (б)
 Fig. 1 The traditional stern part of the icebreaker (a) and SWCs (Steering Wheel Column) stern part (b)

(рис. 1а), и кормовые оконечности, предназначенные для размещения на них винторулевых колонок (ВРК) (рис. 1б) [11]. Кормовые оконечности второго типа могут быть с традиционной компоновкой движительного комплекса либо иметь в качестве движительного комплекса ВРК. Такой пропульсивный комплекс судна называют комбинированным.

Традиционная кормовая оконечность имеет клиновидную форму, как и носовая оконечность, и характер разрушения ледяного покрова кормой практически не отличается от того, что наблюдается при движении носом вперед. Поэтому расчет ледового сопротивления при разрушения ледяного покрова такой оконечностью может быть выполнен обычным способом [12].

Кормовая оконечность, приспособленная к размещению ВРК, имеет характерные отличия от традиционной кормы. Сама кормовая оконечность представляет собой некоторую консольную конструкцию, образуя развитый кормовой свес. Этот свес содержит довольно обширный плоский участок (иногда он может иметь небольшую килеватость, т. е. наклон днища к бортам), на котором располагаются отверстия для размещения ВРК. Размеры плоского участка должны обеспечивать возможность поворота ВРК на 360°. При использовании в качестве движителей ВРК форма корпуса имеет полные кормовые ватерлинии с углами входа, близкими к 90°. Большая полнота кормовых ватерлиний объясняется необходимостью выполнения требования, чтобы при любых поворотах ВРК движитель не выходил за пределы действующей ватерлинии.

В кормовой оконечности за ВРК часто устанавливают ледоотводящие зубья, которые должны защищать стойку ВРК от непосредственного взаимодействия со льдом при движении задним ходом. Часто ледовый зуб устанавливается и в диаметральной плоскости, даже в тех случаях, когда в ней не располагается ВРК. Этот зуб предназначается для раскалывания больших льдин, которые могут образоваться в пространстве между колонками.

Необходимо отметить, что кормовые оконечности судов, имеющих только одну ВРК, занимают промежуточное положение между формами корпуса для традиционного типа движителей и теми, что приспособлены для размещения двух и более ВРК.

Наблюдения за характером разрушения ледяного покрова моделями ледоколов и судов, оснащенных несколькими ВРК, показали, что размеры и внешний вид образующихся обломков льда отличаются от наблюдаемых при разрушении льда традиционной кормой. Основное отличие заключается в том, что при взаимодействии широкой кормы с ледяным покровом выламывается большой фрагмент льда, ширина которого близка к ширине ватерлинии в кормовой оконечности (рис. 2). Наблюдаемая форма образующегося фрагмента льда обуславливается большой протяженностью зоны контакта кормовой оконечности со льдом, что хорошо согласуется с моделью контакта судна со льдом, полученной Д. Е. Хейсиным [13].

Выполненные в ледовом бассейне Крыловского научного центра наблюдения показывают, что описанный выше большой сектор льда выламывается не всегда. Иногда наблюдается несколько иная картина разрушения, при реализации которой ледовые зубья, установленные за бортовыми ВРК, разрушают ледяное поле на относительно малые фрагменты, а между ВРК образуется довольно крупный обломок льда.

Чтобы разобраться в особенностях механизма разрушения льда кормовой оконечностью, рассмотрим более детально механику этого процесса.

Когда судно начинает взаимодействовать кормовой оконечностью с кромкой ледяного поля, последняя сминается и дробится под действием контактных давлений, равных пределу прочности льда на смятие. На ледяной покров и кормовую оконечность судна действует суммарное нормальное усилие F_N , которое задается выражением

$$F_N = \sigma_c S_c, \quad (1)$$

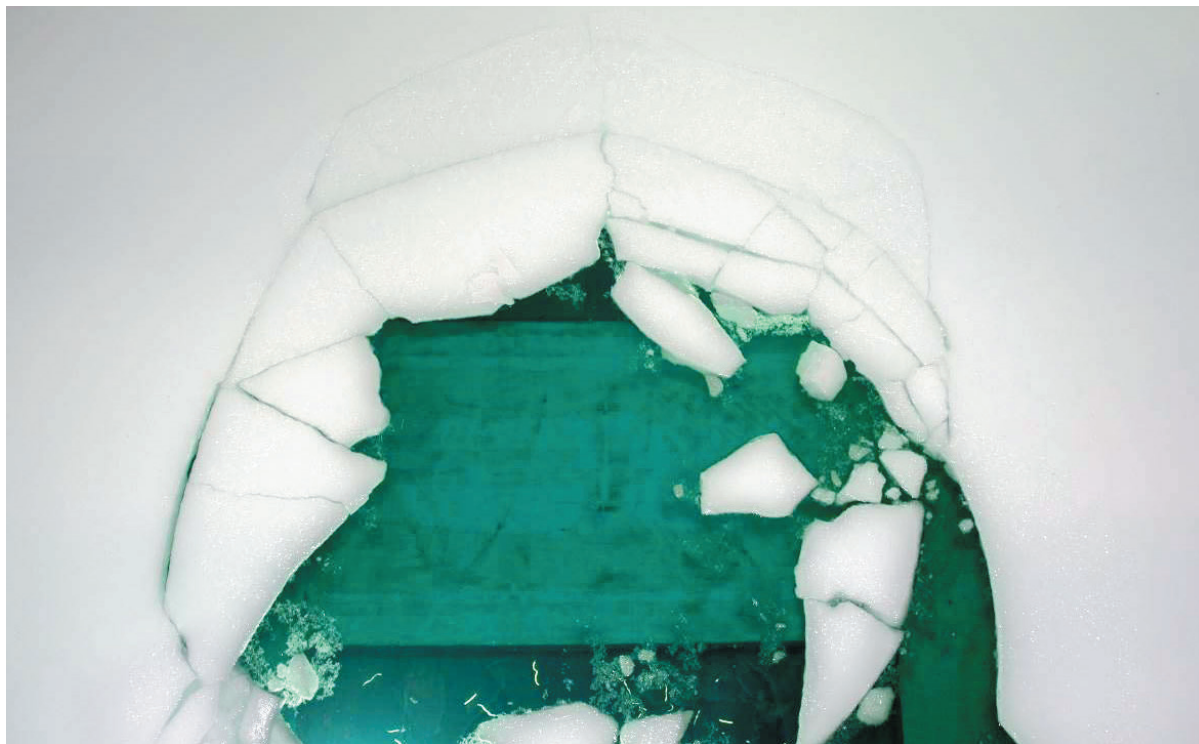


Рис. 2. Характерный фрагмент льда, выламываемый кормовой оконечностью судна, движущегося задним ходом
 Fig. 2 The typical piece of ice broken by the stern end of a ship in reverse motion

где σ_c — предел прочности льда на смятие; S_c — площадь поверхности смятия.

Вертикальная составляющая этого нормального усилия $F_B = F_N \cos \varphi_a$ (φ_a — угол наклона кормового подзора в диаметральной плоскости) вызывает разрушение льда изгибом, а также дифферент судна на нос. В первом приближении угол дифферента судна ψ можно определить по формуле

$$\psi = \frac{F_B L}{2gDH}, \quad (2)$$

где L — длина судна; g — ускорение свободного падения; D — масса судна; H — продольная метацентрическая высота.

Результаты измерений в ледовом бассейне показывают, что угол дифферента ψ редко превышает 1—2°. Но даже при таких незначительных значениях ψ перемещение точек кормы по вертикали будет составлять $y = \frac{L}{2} \sin \psi \approx \frac{L}{2} \psi$. В зависимости

от длины корпуса судна эта величина может быть сопоставима с толщиной преодолеваемого им льда. Поэтому может возникнуть следующая ситуация. Величина вертикальной составляющей нормального усилия взаимодействия кормы с кромкой ледяного поля недостаточна для его разрушения. В то же время это вертикальное усилие приводит к возникновению дифферента судна на нос. Причем вертикальное

перемещение точек кормы будет достаточно для того, чтобы часть кромки льда зашла под корму. Такая ситуация может реализоваться, когда заглупление кормового подзора h_a будет удовлетворять неравенству

$$h_a \leq \frac{L}{2} \psi = \frac{F_B L^2}{4gDH}. \quad (3)$$

При выполнении соотношения (3) в зависимости от особенностей конструкции кормовой оконечности того или иного судна возможны различные варианты развития событий.

1. Если кормовая оконечность не имеет защитных ледовых зубьев, установленных перед ВРК, то после захода части кромки ледяного покрова под кормовой подзор происходит перераспределение нагрузки на кромку. В окрестности диаметральной плоскости судна нагрузка со стороны кормы на кромку ледяного поля снижается, а в районах резкого изменения кривизны ватерлинии нагрузка возрастает. Разрушение ледяного покрова происходит при этом по двум возможным сценариям. В зависимости от геометрических размеров кормы и толщины льда либо каждый из районов увеличения нагрузки вызывает локальное разрушение льда, либо вся действующая на кромку нагрузка воспринимается ледяной пластиной как единая, и разрушение происходит с образованием большого фрагмента льда, размеры которого сопоставимы с размерами кормы.

2. Если защитные ледовые зубья достаточно развиты, то весь контакт ледяной пластины с корпусом судна реализуется по зубьям. Здесь также возможна реализация описанной выше ситуации, когда в зависимости от толщины преодолеваемого судном льда и конкретной конструкции кормовой оконечности на зубьях может происходить локальное разрушение льда изгибом или образовываться достаточно большой единый фрагмент льда. Неким предельным вариантом локального разрушения льда на ледовых зубьях или на стойках ВРК является прорезание ими льда. При размещении в корме двух ВРК при этом часто могут образовываться большие обломки льда, которые способны застревать в пространстве между ними (рис. 3).

Экспериментальные исследования, выполненные в течение последних нескольких лет в ледовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр», показывают, что от реализации того или иного сценария существенно зависит сопротивление при движении судна кормой вперед в сплошных льдах. Анализ позволяет сделать предварительный вывод, что наименьшее сопротивление судно испытывает в случае, если неравенство (3) не выполняется. Так, в одном из экспериментов увеличение осадки судна примерно на 7% привело к снижению ледового сопротивления на 18—20%. Основным эффектом от изменения осадки выразился в изменении характера разрушения ледяного покрова кормовой оконечностью. Проникновение неразрушенного ледяного покрова под кормовой подзор прекратилось. Увеличение осадки способствовало, во-первых, увеличению величины h_a , а во-вторых, вызвало увеличение водоизмещения D .

Влияние работы движительного комплекса на характер движения судна кормой вперед

Анализ влияния работы движительного комплекса на характер движения задним ходом в первую очередь необходим для корректной постановки и проведения модельных экспериментов. В отличие от натуральных условий, когда основные параметры движения однозначно определяются уровнем мощности, подводимой к движителям, а также толщиной и прочностью преодолеваемого льда, в модельном эксперименте имеется больше свободы для назначения параметров движения. Так, при принятой в ряде ледовых бассейнов методи-

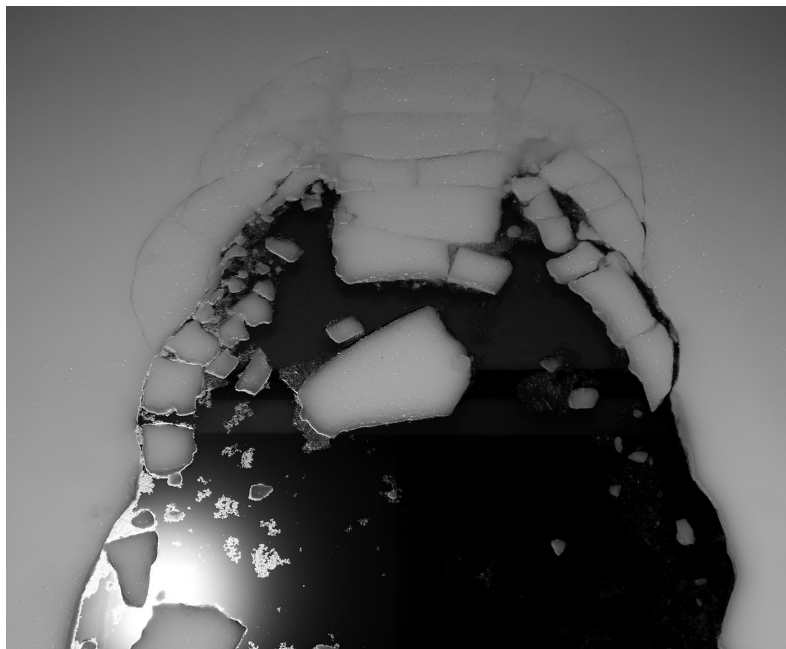


Рис. 3. Крупный обломок льда, выламываемый кормовой оконечностью, на которой установлены две ВРК
Fig. 3. A large piece of ice broken by stern part with two SWCs

ке определение сопротивления льда движению судна задним ходом осуществляется с помощью буксировки моделей с работающими движителями (рис. 4) [14]. В этом случае скорость движения модели однозначно задается скоростью движения буксировочной тележки. Формально используемая методика позволяет задавать при проведении эксперимента любые значения частоты вращения движителей при условии, что частота вращения остается постоянной при испытаниях в ледовых условиях и на чистой воде.

Однако визуальные наблюдения за моделью судна при испытаниях по изучению ледового сопротивления заднего хода показывают, что в зависимости от уровня гидродинамической нагрузки на движитель (частоты вращения и скорости движения модели) изменяется характер обтекания корпуса приотпленными льдинами. Это может существенным образом отразиться на величине ледового сопротивления модели. В ледовом бассейне Крыловского научного центра неоднократно проводились исследования влияния изменения частоты вращения на результаты измерения ледового сопротивления. Так, в [11] приведен график зависимости относительного сопротивления модели от скорости движения. Для верификации полученных данных этот график дополнен новыми данными, полученными по результатам испытаний крупнотоннажного судна кормой вперед на различных оборотах. В частности, график дополнен данными, полученными для частоты вращения гребных винтов, составляющей 27% частоты вращения, соответствующей уров-



Рис. 4. Буксировка модели с работающими гребными винтами в ледовом опытном бассейне

Fig. 4. Towing a model with working propellers in an ice test tank

ню мощности судна 100%, для одной из концепций газовоза класса ЯмалМакс при буксировочных испытаниях на скоростях хода от 2 до 5 уз в ровном сплошном ледяном покрове толщиной 1,5 м (рис. 5).

Этот график, разработанный по результатам анализа ледового сопротивления нескольких моделей судов, убедительно показывает, что снижение частоты вращения движителей приводит к увеличению ледового сопротивления модели, движущейся кормой вперед.

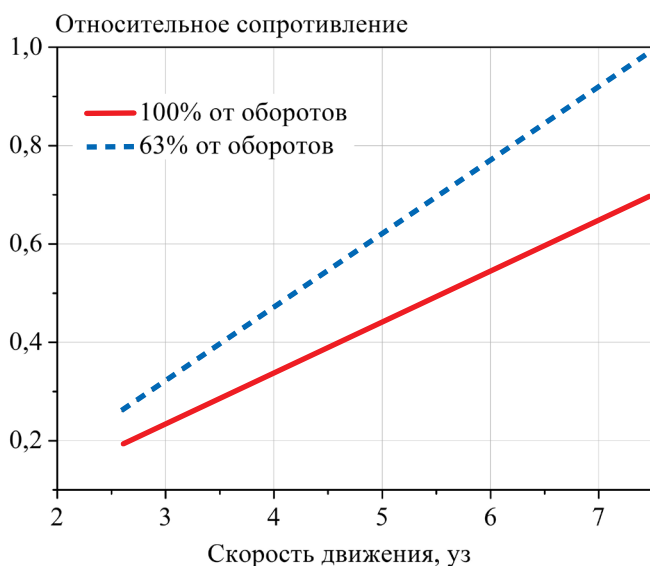


Рис. 5. Зависимость относительного сопротивления модели от скорости движения и частоты вращения движителей при движении кормой вперед
Fig. 5. The dependence of the model relative resistance on the motion speed and the rotation frequency of the movers when moving stern forward

Полученные данные также свидетельствуют о необходимости правильно назначать частоты вращения движителей при проведении экспериментов по определению ледового сопротивления судов, двигающихся задним ходом во льдах.

Нахождение необходимой частоты вращения движителей — нетривиальная задача теории ходкости судов. Дело в том, что выполнить с использованием обычных приемов расчеты ходкости судов, двигающихся во льдах, не представляется возможным. При характерных для движения во льдах значениях скорости и гидродинамической нагрузки на движители ряд необходимых для расчета параметров (коэффициент попутного потока) становятся отрицательными и не могут быть использованы. Из-за этого тяговые характеристики ледоколов и судов ледового плавания достаточно долго определялись приблизительно, на основе данных для швартовного режима и для относительно высокой скорости движения на чистой воде. Определить же частоты вращения движителей вообще невозможно, они оценивались по данным расчета для швартовного режима.

Для преодоления указанной трудности специалисты Крыловского научного центра разработали новую альтернативную классическую систему коэффициентов взаимодействия движителей с корпусом судна, которая лишена присущих традиционной системе коэффициентов недостатков [15; 16]. Движение судна в ледовом поле происходит при малых значениях поступи J_{05} ¹. При этих значениях поступи классическая система коэффициентов взаимодействия оказывается неработоспособной, поскольку начиная с некоторой поступи значения коэффициента попутного потока уходят в отрицатель-

¹ Малые значения поступи гребного винта находятся в пределах 0–0,3.

ную область и стремятся к минус бесконечности на швартовном режиме. Проведенные исследования показали, что новая система коэффициентов взаимодействия эквивалентна традиционной. С помощью новой системы были выполнены расчеты ледовой ходкости ледоколов и судов ледового плавания на режиме движения во льдах передним ходом [17; 18], которые показали высокую эффективность новых методов и возможность расчетного определения всех параметров ходкости судов во льдах.

В настоящее время ведутся исследования по использованию швартовной системы коэффициентов взаимодействия для проведения расчетов ходкости при движении кормой вперед. Они показывают, что для каждого режима движения судна кормой вперед можно рассчитать соответствующую частоту вращения движителей, которая обеспечивает моделирование обтекания подводной части корпуса струями и его очистку ото льда.

Заключение

Рассмотрены важные особенности, связанные с движением судов кормой вперед во льдах. Эти особенности касаются характера разрушения льда кормовой оконечностью судна, а также влияния правильности выбора частоты вращения движителей на результаты модельных исследований по определению ледового сопротивления.

Описание в первой части статьи качественной картины разрушения ледяного покрова кормовой оконечностью судна стало возможно лишь благодаря хорошим средствам визуализации процессов, происходящих при взаимодействии кормы и движителей со льдом. Детальный анализ испытаний более десятка различных моделей позволил выявить некоторые общие закономерности и построить некоторую качественную картину наблюдаемых явлений. Наличие такой картины позволяет перейти к более детальному построению математической модели явлений.

Второй аспект проблемы, рассмотренный в работе, не менее важен. Основным недостатком существующих в настоящее время расчетных методов является отсутствие учета влияния работающего движителя на уровень воспринимаемого судном ледового сопротивления. Для правильного учета этого обстоятельства необходимо понимание характера влияния, которое гидродинамическая нагрузка на движитель оказывает на ледовое сопротивление. Приводимые в статье данные дают возможность оценить это влияние.

Литература

1. *Juurmaa K., Mattsson T., Wilkman G.* The development of the new double acting ships for ice operation // Proceedings of POAC 01. — Ottawa, Canada, 2001.
2. *Цой Л. Г., Андрюшин А. В., Штрек А. А.* Обоснование основных параметров перспективных крупнотон-

нажных газозовозов для Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2013. — № 3 (97). — С. 46—56.

3. *Штрек А. А.* Проектные вопросы маневренности и ходкости при ледовых сжатиях перспективных крупнотоннажных судов арктического плавания // Мор. вестн. — 2013. — № 4 (48). — С. 90—93.
4. *Backstrom M., Juurmaa K., Wilkman G.* New Ice-breaking Tanker Concept for the Arctic (DAT) // Proceedings of POAC 95. — Murmansk, 1995.
5. *Игнатъев М. А.* Гребные винты судов ледового плавания. — Л.: Судостроение, 1966. — 114 с.
6. *Сазонов К. Е.* О ледовой ходкости и управляемости крупнотоннажных судов двойного действия в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2016. — № 1 (107). — С. 50—60.
7. *Сазонов К. Е., Добродеев А. А.* Ледовая ходкость крупнотоннажных судов. — СПб.: Крыл. гос. науч. центр, 2017. — 122 с.
8. *Su B., Skjetne R., Berg T. E.* Numerical assessment of a double-acting offshore vessel's performance in level ice with experimental comparison // Cold Reg. Sci. Technol. — 2014. — 106—107. — P. 96—109.
9. *Su B., Riska K., Moan T.* A numerical method for the prediction of ship performance in level ice // Cold Reg. Sci. Technol. — 2010. — 60. — P. 177—188.
10. *Денисов В. И., Сазонов К. Е., Тимофеев О. Я.* Новые экспериментальные возможности Крыловского государственного научного центра по изучению ледовых воздействий на объекты морской техники // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 3 (19). — С. 76—81.
11. *Лопашев К. А.* Особенности взаимодействия кормовой оконечности ледоколов и судов ледового плавания с ледяным покровом // Тр. Крыл. гос. науч. центра. — 2017. — 2 (380). — С. 24—31.
12. *Сазонов К. Е.* Теоретические основы плавания судов во льдах. — СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2010. — 274 с.
13. *Хейсин Д. Е.* Прочность ледяного поля под действием нагрузки, приложенной к его кромке // Тр. ААНИИ. — 1960. — Т. 237. — С. 133—152.
14. *Добродеев А. А., Клубничкин А. М., Сазонов К. Е.* Самоходные испытания моделей в ледовых бассейнах для определения ледового сопротивления // Тр. Крыл. гос. науч. центра. — 2015. — Вып. 90 (374). — С. 109—116.
15. *Каневский Г. И., Клубничкин А. М., Щербанов И. В.* Швартовая система коэффициентов взаимодействия гребных винтов с корпусом // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2011. — Вып. 59 (343). — С. 77—88.
16. *Kanevskii G. I., Klubnichkin A. M.* Propeller-hull interaction coefficients: classic vs alternative system // Proceedings of 5th Int. Symp. on Marine Propulsors. — 2017. — Vol. 3, paper 1124 (4).
17. *Kanevskii G. I., Klubnichkin A. M., Sazonov K. E.* The calculation of the propulsion in ice field using the alternative system of the propeller-hull interaction coefficients // Proceedings of the 37th International

Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering, OMAE17, June 17–22, 2018, Madrid, Spain, OMAE2018-77210.

18. Kanevsky G. I., Klubnichkin A. M., Ryzhkov A. V., Sazonov K. E. Method for estimation of icebreaker propulsion performance in ice // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 193 012027 7.7.

Информация об авторах

Добродеев Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, начальник сектора, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), e-mail: A_Dobrodeev@ksc.ru.

Сазонов Кирилл Евгеньевич, доктор технических наук, начальник лаборатории, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лощманская ул., д. 3), e-mail: kirsaz@rambler.ru.

Саперштейн Игорь Алексеевич, инженер, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), e-mail: sapershteyn@mail.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Добродеев А. А., Сазонов К. Е., Саперштейн И. А. Движение судов задним ходом во льдах: некоторые результаты исследований // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 99—106. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-99-106.

REVERSE MOTION OF SHIPS IN ICE: SOME RESEARCH RESULTS

Dobrodeev A. A.

Krylov State Research Centre (St. Petersburg, Russian Federation)

Sazonov K. E.

Krylov State Research Centre, State Marine Technical University (St. Petersburg, Russian Federation)

Sapershteyn I. A.

Krylov State Research Centre (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on July 28, 2019

Abstract

Some results of studies performed in the ice tank of the Krylov State Research Center are presented, as well as theoretical estimates related to the study of the ships stern motion in level ice are given. The analysis of the interaction of the vessel stern end with level ice cover, is carried out, as well as the effect of the rotational speed of the propellers during model tests in the ice tank on the ice resistance of the vessel is assessed. The results allow evaluating the effectiveness of marine transport systems and can be used to develop requirements in the field of ice performance for designed icebreakers and heavy-tonnage ice vessels.

Keywords: *ice vessel, reverse motion, double-acting vessels, stern, ice breaking.*

References

1. Juurmaa K., Mattsson T., Wilkman G. The development of the new double acting ships for ice operation. Proceedings of POAC 01. Ottawa, Canada, 2001.
2. Tsoi L. G., Andryushin A. V., Shtrek A. A. Obosnovanie osnovnykh parametrov perspektivnykh krupnotonnaznykh gazovozov dlya Arktiki. [Justification of main parameters for heavy-tonnage gas carriers for the Arctic. Problemy Arktiki i Antarktiki, 2013, no. 3 (97), pp. 46—56. (In Russian).
3. Shtrek A. A. Proektnye voprosy manevrennosti i khodkosti pri ledovykh szhatiyakh perspektivnykh krupnotonnaznykh sudov arkticheskogo plavaniya. [Design issues of ice maneuverability and performance during ice compression for modern high-capacity Arctic

vessels]. *Mor. vestn.*, 2013, no. 4 (48), pp. 90—93. (In Russian).

4. *Backstrom M., Juurmaa K., Wilkman G.* New Icebreaking Tanker Concept for the Arctic (DAT). Proceedings of POAK 95. Murmansk, 1995.

5. *Ignat'ev M. A.* Grebnye vinty sudov ledovogo plavaniya. [Propellers of ice vessels]. Leningrad, Sudostroenie, 1966, 114 p. (In Russian).

6. *Sazonov K. E.* O ledovoi khodkosti i upravlyaemosti krupnotonnazhnykh sudov dvoynogo deistviya v Arktike. [About ice performance and maneuverability of heavy-tonnage double-acting ships in Arctic]. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2016, no. 1 (107), pp. 50—60. (In Russian).

7. *Sazonov K. E., Dobrodeev A. A.* Ledovaya khodkost' krupnotonnazhnykh sudov. [Ice performance of heavy-tonnage vessels]. St. Petersburg, *Kryl. gos. nauch. tsentra*, 2017, 122 p. (In Russian).

8. *Su B., Skjetne R., Berg T. E.* Numerical assessment of a double-acting offshore vessel's performance in level ice with experimental comparison. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2014, 106—107, pp. 96—109.

9. *Su B., Riska K., Moan T.* A numerical method for the prediction of ship performance in level ice, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2010, 60, pp. 177—188.

10. *Denisov V. I., Sazonov K. E., Timofeev O. Ya.* Novye eksperimental'nye vozmozhnosti Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra po izucheniyu ledovykh vozdeistvii na ob'ekty morskoi tekhniki. [New experimental capabilities of the Krylov State Research Center for study of ice impact on marine equipment]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2015, no. 3 (19), pp. 76—81. (In Russian).

11. *Lopashev K. A.* Osobennosti vzaimodeistviya kormovoi okonechnosti ledokolov i sudov ledovogo plavaniya s ledyanym pokrovom. [The features of icebreakers

and ice vessel stern interaction with ice]. *Tr. Kryl. gos. nauch. tsentra*, 2017, 2 (380), pp. 24—31. (In Russian).

12. *Sazonov K. E.* Teoreticheskie osnovy plavaniya sudov vo l'dakh. [Theoretical principles of ship navigation in ice]. St. Petersburg, TsNII im. akad. A. N. Krylova, 2010, 274 p. (In Russian).

13. *Kheisin D. E.* Prochnost' ledyanogo polya pod deistviem nagruzki, prilozhennoi k ego kromke. [The strength of ice sheet under the loading on ice edge]. *Tr. AANII*, 1960, vol. 237, pp. 133—152. (In Russian).

14. *Dobrodeev A. A., Klubnichkin A. M., Sazonov K. E.* Samokhodnye ispytaniya modelei v ledovykh basseinakh dlya opredeleniya ledovogo soprotivleniya. [Self-propelled tests of models in ice tanks to determine ice resistance]. *Tr. Kryl. gos. nauch. tsentra*, 2015, iss. 90 (374), pp. 109—116. (In Russian).

15. *Kanevskii G. I., Klubnichkin A. M., Shcherbakov I. V.* Shvartovaya sistema koeffitsientov vzaimodeistviya grebnykh vintov s korpusom. [Propeller-hull interaction coefficients]. *Tr. TsNII im. akad. A. N. Krylova*, 2011, iss. 59 (343), pp. 77—88. (In Russian).

16. *Kanevskii G. I., Klubnichkin A. M.* Propeller-hull interaction coefficients: classic vs alternative system. Proceedings of 5th Int. Symp. on Marine Propulsors, 2017, vol. 3, paper 1124 (4).

17. *Kanevskii G. I., Klubnichkin A. M., Sazonov K. E.* The calculation of the propulsion in ice field using the alternative system of the propeller-hull interaction coefficients. Proceedings of the 37th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering, OMAE17, June 17—22, 2018, Madrid, Spain, OMAE2018-77210.

18. *Kanevsky G. I., Klubnichkin A. M., Ryzhkov A. V., Sazonov K. E.* Method for estimation of icebreaker propulsion performance in ice. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 193 012027 7.7.

Information about the authors

Dobrodeev Aleksei Alekseevich, PhD of Engineering Science, Head of Section, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), e-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru.

Sazonov Kirill Evgenevich, Doctor of Engineering Science, Head of Laboratory, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), Professor, State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, Russia, 190121), e-mail: kirsaz@rambler.ru.

Sapershteyn Igor Alekseevich, Engineer, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), e-mail: Sapershteyn@mail.ru.

Bibliographic description

Dobrodeev A. A., Sazonov K. E., Sapershteyn I. A. Reverse motion of ships in ice: some research results. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 4 (36), pp. 99—106. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-99-106. (In Russian).

© Dobrodeev A. A., Sazonov K. E., Sapershteyn I. A., 2019