

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-63-73>

УДК 551.467; 629.5



Об определении эффективного давления сжатия льда по данным натурных измерений параметров движения судов

К.Е. Сазонов^{1,2✉}, А.А. Добродеев^{1,2}

¹ Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия

✉ K_Sazonov@ksrc.ru

КЕС, 0000-0003-3364-1309; ААД, 0000-0001-6305-5090

Аннотация. Сжатия льда относятся к опасным ледовым явлениям, препятствующим судоходству во льдах и в некоторых случаях приводящим к гибели судов. В изучении этого природного явления достигнуты значительные результаты, позволяющие осуществлять его прогнозирование и рекомендовать маршруты движения судов во льдах вне опасных зон. Воздействие ледовых сжатий на корпус судна изучено хуже. Основной причиной являются трудности в определении силового воздействия ледовых сжатий различной интенсивности, которая оценивается с помощью специальных шкал визуально, на корпус судна. В работе предлагается ввести понятие эффективного давления ледовых сжатий, которое, являясь маркером происходящих процессов, позволило бы оценивать дополнительное ледовое сопротивление, испытываемое судном. Аналогичный подход успешно применяется при определении глобальной ледовой нагрузки на инженерные сооружения. В работе предложен метод определения эффективного давления сжатия льда, основанный на измерении ходовых характеристик судна (мощности, скорости и частоты вращения движителей), а также на измерении скорости закрытия канала за судном. Такие измерения должны проводиться в близких ледовых условиях при наличии и отсутствии ледовых сжатий. Скорость закрытия канала за судном можно связать с интенсивностью ледовых сжатий. Для расчета дополнительного сопротивления судна используются специальные диаграммы ледовой ходкости, построение которых для конкретного судна осуществляется на основании данных стандартных модельных испытаний в гидродинамическом бассейне. Обсуждается возможность применения описанного метода и возможные ограничения. Данные об эффективном давлении сжатия представляют значительный интерес для прогнозирования работы морских арктических транспортных систем и, возможно, для изучения динамики ледяного покрова.

Ключевые слова: ледовые сжатия, эффективное давление, тяга движительного комплекса судна, коэффициент трения льда об обшивку корпуса

Для цитирования: Сазонов К.Е., Добродеев А.А. Об определении эффективного давления сжатия льда по данным натурных измерений параметров движения судов. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(1):63–73. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-63-73>

Поступила 15.11.2024

После переработки 28.12.2024

Принята 07.02.2025

© Авторы, 2024

© Authors, 2024

Determining effective pressure in ice compressions based on full-scale measurements of ship motion parameters

Kirill E. Sazonov^{1,2✉}, Aleksei A. Dobrodeev^{1,2}

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

✉K_Sazonov@ksrc.ru

ORCID KES, 0000-0003-3364-1309; AAD, 0000-0001-6305-5090

Abstract. Ice compressions are among navigation hazards that impede navigation in freezing waters and sometimes result in loss of ships. Recent advances in the investigation of this ice feature enable its prediction and make it possible to recommend safe navigation routes for ships, bypassing hazardous zones. The effect of ice compression on hull structures is less understood. First of all, this is because ice compression actions are difficult to determine accurately and are currently estimated by means of special visual scales (marks) drawn on the hull. This paper proposes using the parameter of effective pressure for ice compressions. Effective pressure is always present in the case of ice compression phenomena, so it could be used as an assessment criterion for the added resistance of the ship. A similar approach has been successfully applied to determine the global ice load on engineering structures. This paper suggests a method for determining the effective pressure of ice compression based on ship propulsion performance data (engine power, movement speed and propeller RPM), as well as on the measured speed of ice channel closing behind the ship. These measurements must be taken in similar ice conditions with and without ice compressions. The speed of ice channel closing behind the ship could be used to quantify ice compression intensity. Added resistance of ships is calculated using the special diagrams of ice propulsion performance made which are made for specific ships based on the results of standard model tests in hydrodynamic tanks. The paper discusses the prospects and possible limitations of this method. Effective ice compression data would be very interesting for the prediction of operational conditions of Arctic transportation systems and, possibly, for the investigation of ice sheet dynamics.

Keywords: ice compression, effective pressure, thrust of ship propulsion system, ice/hull friction coefficient

For citation: Sazonov K.E., Dobrodeev A.A. Determining effective pressure in ice compressions based on full-scale measurements of ship motion parameters. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(1):63–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-63-73>

Received 15.11.2024

Revised 28.12.2024

Accepted 07.02.2025

Введение

Ледовые сжатия относятся к числу наиболее опасных для судоходства в Арктике ледовых явлений [1]. Воздействие ледовых сжатий на судно приводит к снижению скорости его движения вплоть до полной остановки, а при весьма интенсивных сжатиях возможны локальные повреждения корпуса. Ранее ледовые сжатия неоднократно были причиной гибели судов во льдах. Попытки описания и изучения этого явления предпринимались начиная с момента начала ледового судоходства на Балтийском море. Тем не менее существенного прогресса в этом достигнуто не было. В одной из недавних работ, опубликованной финскими специалистами, отмечается, что исследования по этой теме проводятся относительно редко и надлежащих методов оценки связанного с этим риска недостаточно [2]. В то же время данные о влиянии ледовых сжатий на скорость движения судов на замерзающих акваториях являются крайне важными для прогнозирования параметров рейсов судов [3, 4].

Подавляющее большинство исследований, посвященных изучению ледовых сжатий, выполнено в натурных условиях. В этих условиях наличие ледовых сжатий и их интенсивность определяются «на глаз» в соответствии со шкалами ледовых сжатий. Эти шкалы не одинаковы в разных странах. Так, существует принятая в России шкала [1] и шкала, применяемая в Ботническом заливе Финляндией и Швецией [5]. Натурные наблюдения позволили установить многие важные характеристики ледовых сжатий, выполнять математическое моделирование зафиксированных случаев их возникновения и осуществлять прогнозирование возникновения этого природного явления [6]. Важным представляется подход, предложенный А.Т. Казаковым, в соответствии с которым одним из важнейших признаков для определения интенсивности ледовых сжатий является быстрота закрытия канала за судном. Им предложена некоторая эмпирическая зависимость между скоростью закрытия канала и степенью сжатия льда, представленная в виде таблицы (см. табл. 1) [7].

Таблица 1

Скорость закрытия канала за ледоколом
 в зависимости от степени сжатия ледяного покрова

Table 1

The speed of channel closure behind the icebreaker depending on the degree of compression of the ice cover	
Степень сжатия, баллы	Скорость закрытия канала, м/с
0–1	0,01–0,02
1	0,04–0,05
1–2	0,07–0,08
2	0,15–0,20
2–3	0,23–0,27
3	> 0,30

Данные этой таблицы (средние значения) могут быть аппроксимированы следующим выражением [8]:

$$V_p = 0,005s + 0,0376s^2, \text{ м/с,}$$
(1)

V_p — скорость закрытия канала; s — степень сжатия льда в баллах.

Этот подход для оценки интенсивности ледовых сжатий представляет наиболее удобным потому, что он не зависит от направления действия сжатий. На скорость закрытия канала влияет лишь составляющая усилий сжатия, которая перпендикулярна оси канала. Эта же составляющая также вызывает появление дополнительного ледового сопротивления у судна, движущегося в зоне сжатия. Таким образом, по скорости закрытия канала за судном определяется лишь интенсивность сжатий, влияющих на параметры его движения. При этом общая интенсивность сжатия ледяного покрова может быть больше, т. к. судно, которое движется курсом, параллельным направлению действия ледовых сжатий, может практически не иметь дополнительного ледового сопротивления.

В настоящее время для регистрации скорости закрытия канала в условиях сжатия льда используется специализированная телевизионная система [9, 10], разработанная специалистами ААНИИ. К сожалению, в доступных авторам литературных источниках отсутствуют публикации, в которых бы излагались результаты

применения этой системы. Это обстоятельство послужило одной из причин написания данной работы, в которой излагается возможный подход к обработке данных измерений скорости закрытия канала для получения информации, важной для проведения расчетов ледовой ходкости судов.

Методы оценки влияния ледовых сжатий на характеристики ледовой ходкости

Одна из первых попыток определить дополнительное ледовое сопротивление судна ΔR , возникающее из-за действия на него ледовых сжатий, была предпринята А. Ассуром [11]. Он предложил формулу для вычисления этого сопротивления, которое, по его мнению, возникает на цилиндрической вставке судна L_p , попавшего в зону сжатий:

$$\Delta R = 2f_{ID}(\sigma + \sigma_0)L_p h, \quad (2)$$

где f_{ID} — коэффициент трения льда об обшивку корпуса, $\sigma_0 = 8$ кПа — эмпирический коэффициент, σ — напряжения сжатия в ледяном покрове, h — толщина льда. Применение этой формулы затруднено из-за неопределенности в задании напряжений сжатия в ледяном покрове и установлении соответствия между ними и степенью сжатия льда, выраженной в баллах. В настоящее время имеются лишь данные, полученные на основании анализа результатов численного моделирования дрейфа льда в различных регионах Арктики [12]. Эти данные (см. табл. 2, заимствованную из работы [12]) обладают большим диапазоном изменения нормального напряжения в ледяном покрове, что не позволяет эффективно использовать их для дополнительного ледового сопротивления судна, вызванного ледовыми сжатиями.

Предпринимались попытки изучения особенностей процесса взаимодействия судна со сжатыми льдами с помощью модельного эксперимента в ледовых бассейнах. Наиболее активно такие опыты проводили финские специалисты [13, 14], подобные исследования выполнялись также в ледовом бассейне Крыловского научного центра [8]. По результатам выполнения в финском ледовом бассейне совместного с Институтом проблем механики РАН научно-исследовательского проекта была предложена следующая методика расчета дополнительного сопротивления, возникающего при сжатии, основными допущениями которой являются предположения о перпендикулярности действия сжатий курсу судна и наличие прямых бортов на цилиндрической вставке [15]. Расчетные формулы этой методики следующие:

$$\begin{aligned} P_n &= P_0 \left\{ 1 - \frac{0,975hV_s^{2/3}}{L_p V_i} \left[\left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2} \frac{\sigma_f}{\sigma_c} \right]^{1/3} \right\}, \\ \Delta R_\alpha &= 2,5P_n \sin \left(\arctg \frac{V_s}{V_i} \right), \\ \Delta R_{fr} &= P_n f_{ID}, \\ \Delta R &= \Delta R_\alpha + \Delta R_{fr}, \end{aligned} \quad (3)$$

где V_s , V_i — скорости судна и льда в направлении, перпендикулярном движению судна соответственно; L_p — длина цилиндрической вставки; E — модуль упругости льда; σ_f , σ_c — прочность льда на изгиб и смятие; ρ — плотность льда; ΔR_α , ΔR_{fr} — составляющие дополнительного сопротивления, первая связана с непосредственным

Таблица 2

Шкала перехода от среднего нормального напряжения к степени сжатия льда
Table 2

Scale of transition from average normal stress to the degree of compression of ice

Среднее нормальное напряжение, 10 ⁵ /Па	Степень сжатия, баллы
0,001–0,01	0–1
0,01–0,1	1
0,1–0,3	1–2
более 0,3	3

давлением на носовое заострение, вторая с трением по цилиндрической вставке. $P_0 = 1$ в случае, если судно потеряло ход из-за действия сжатий. Это соотношение показывает, что дополнительное ледовое сопротивление измеряется в условных единицах. По-видимому, P_0 можно трактовать как тягу движительного комплекса на швартовном режиме.

Авторы работы [15] отмечают, что приведенные соотношения являются весьма приблизительными и должны в дальнейшем быть уточнены и дополнены. Обращает на себя внимание то, что авторы работы используют безразмерные величины для описания воздействия ледовых сжатий на судно. Это означает, что они фактически пытаются использовать характеристики судна для определения интенсивности воздействия сжатия. Именно этот подход будет использован в данной работе для оценки численных, характеризующих интенсивность сжатия льда и позволяющих рассчитывать параметры ледовой ходкости судна.

Современные методы определения тяговых характеристик судна

Казалось бы, сопротивление воды движению натурального судна легко определить, приравняв его тяге движительного комплекса при заданной скорости. Однако хорошо известно, что при проведении натурных испытаний судов на чистой воде нельзя точно определить его сопротивление. Это связано с тем, что мы не имеем возможности измерить тягу движительного комплекса судна. В лучшем случае путем специальных измерений можно зарегистрировать лишь упор движителей. Расчетным путем определить по данным модельного гидродинамического эксперимента зависимость тяги от скорости движения на чистой воде для значительного диапазона изменения скорости представляется весьма затруднительным из-за существенного влияния масштабного эффекта как на само сопротивление, так и на коэффициенты взаимодействия корпуса и движителя. Удовлетворительные расчетно-экспериментальные схемы разработаны лишь для режимов движения судна, близких к полному ходу, для которых прогнозирование тяги вполне удовлетворительно.

Для судов, эксплуатирующихся в ледовых условиях, до недавнего времени ситуация была еще более сложной. При движении во льдах судно по сравнению с условиями чистой воды испытывает дополнительное ледовое сопротивление, что приводит к заметному снижению скорости движения и повышению гидродинамической нагрузки на движители. В этих условиях практически для всех судов не было возможности рассчитать их тяговые характеристики, как для модели, так и для натурy, за исключение швартовного режима. Эта ситуация связана с тем, что в условиях, соответствующих движению во льдах, коэффициент попутного потока становится отрицательным и при снижении скорости стремится к минус бесконечности [16].

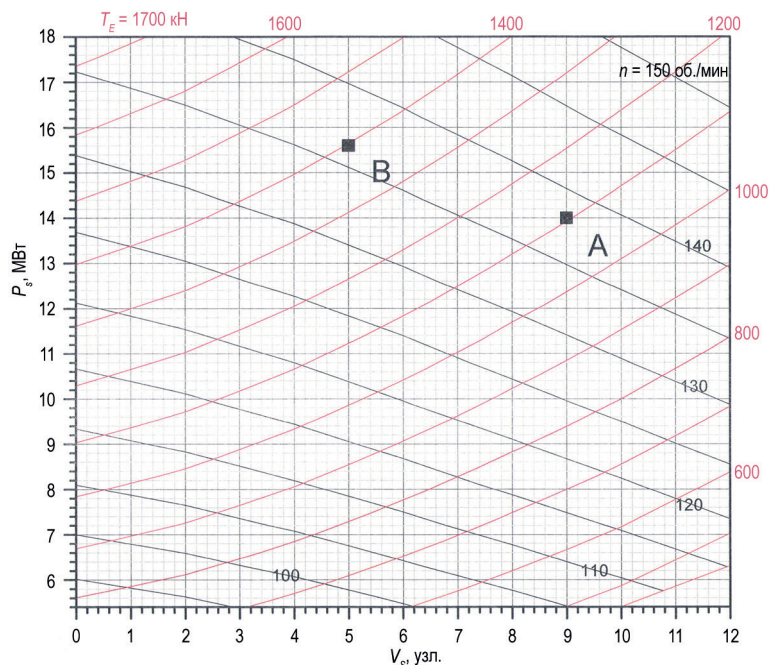


Рис. 1. Диаграмма тяговых и других гидродинамических характеристик ледокола проекта 21900М

Fig. 1. Diagram of thrust and other hydrodynamic characteristics of the icebreaker of project 21900M

Возможность полного расчета всех ходовых характеристик движущегося во льдах судна, включая тяговые, появилась относительно недавно, после разработки специалистами Крыловского центра новой системы коэффициентов взаимодействия, которая полностью эквивалентна ранее применявшейся, но позволяет обойти указанную выше трудность [16]. Теперь для любых скоростей движения судна во льдах, включая сколь угодно малые, можно выполнить все расчеты ходовых характеристик (мощность, частота вращения движителя, тяга и прочее). Особенно важно отметить, что при небольших скоростях движения влиянием масштабного эффекта на гидродинамические характеристики можно пренебречь. Результаты таких расчетов удобно представить в виде диаграммы ледовой ходкости [17] (см. рис.). Такие диаграммы можно построить для любого судна, для которого при проектировании выполнен стандартный набор гидродинамических модельных испытаний. В настоящее время диаграммы используются для анализа данных натурных испытаний судов [18].

Дополнительное сопротивление сжатия и эффективное давление

Представленные выше диаграммы дают возможность использования судна в качестве «пробного тела» для определения дополнительного ледового сопротивления, возникающего при действии на его корпус ледовых сжатий. В самом деле, рассмотрим ситуацию, представленную на рис. 1. Пусть в точке А судно движется в некоторых ледовых условиях, при этом ледовые сжатия отсутствуют. Затем судно попадает в зону ледовых сжатий, и его параметры движения соответствуют точке В на рис. 1. В соответствии с диаграммой тяга движительного комплекса в точке А была равна 1100 кН, в точке В — 1400 кН. Соответственно дополнительное со-

противление, вызванное сжатиями, будет равно $\Delta R = 300$ кН. Приведенные выкладки справедливы только в том случае, если ледовые условия, в первую очередь толщина ледяного покрова, сильно не изменились или их изменение можно трактовать как влияние наличия ледовых сжатий.

Если судно снабжено телевизионной системой измерения скорости закрытия канала, то в результате многократного применения описанной операции можно получить данные для построения усредненной зависимости $\Delta R = f(V_i)$, а используя формулу (1), и зависимости $\Delta R = f(s)$.

Полученные таким образом зависимости подходят для анализа движения конкретного судна, но не очень удобны для дальнейшего использования применительно к другим судам, т. к. довольно сильно зависят от особенностей формы корпуса судна, используемого как «пробное тело». Для уменьшения влияния формы корпуса судна удобно от силы дополнительного сопротивления перейти к понятию эффективного давления сжатия p_{eff} и номинальной площади S_{nom} . Эти понятия широко используются в морской ледотехнике для определения глобальной ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения [19]. Для ее определения вводится понятие номинальной площади контакта, которая определяется произведением ширины сооружения в направлении дрейфа льда на толщину ледяного покрова. При таком подходе глобальная ледовая нагрузка вычисляется как произведение некоторого эффективного давления на номинальную площадь контакта. Эффективное давление определяется как некоторое условное давление, соответствующее моменту достижения глобальной нагрузкой максимального значения. При этом эффективное давление практически никогда нельзя отождествлять с каким-либо физическим процессом, происходящим при взаимодействии сооружения со льдом.

Для определения эффективного давления в случае действия на корпус судна ледовых сжатий, по-видимому, можно предложить целый ряд расчетных схем. Ниже в качестве примера приводятся две такие схемы.

Схема 1. Она полностью соответствует подходу, применяемому при определении ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения. Номинальная площадь контакта определяется как сумма длины носового заострения судна L_b и длины цилиндрической вставки L_p , умноженная на толщину льда h :

$$S_{n1} = 2(L_b + L_p)h. \quad (4)$$

Множитель 2 указывает, что ледовые сжатия действуют на оба борта судна. В формуле (4) при определении номинальной площади используются длины носового заострения и цилиндрической вставки, т. к. обычно считается, что кормовая оконечность не взаимодействует со сжатым льдом, при любом сжатии канал не закрывается сразу за кормой судна. Но в принципе можно использовать и полную длину судна по ватерлинии L , это вопрос договоренности. Возможно, такое определение номинальной площади контакта будет более удобным при выполнении исследований и последующем использовании полученных результатов.

Сила дополнительного сопротивления от сжатия льда будет равна:

$$\Delta R = 2f_{ID}f_{eff}(L_b + L_p)h, \quad (5)$$

откуда находится выражение для эффективного давления:

$$p_{eff1} = \frac{1}{2h} \frac{\Delta R}{f_{ID}(L_b + L_p)}. \quad (6)$$

Схема 2. В этой схеме дополнительно вводится среднее значение угла наклона ватерлинии к диаметральной плоскости $\bar{\alpha}$ на носовом заострении судна. Этот угол задается следующим выражением:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{L_b} \int_{L/2-L_b}^{L/2} \alpha(x) dx, \quad (7)$$

здесь $\alpha(x)$ — распределение углов наклона ватерлинии по длине носового заострения; L — длина судна. Начало оси OX находится на миделе, ось направлена в нос.

В рассматриваемой расчетной схеме учитывается, что действие ледовых сжатий проявляется не только в увеличении силы трения, но и в непосредственном давлении на носовую оконечность. Величина эффективного давления считается постоянной и задается следующим выражением:

$$p_{eff2} = \frac{1}{2h \sin \bar{\alpha} (1 + f_{ID}) L_b + f_{ID} L_p} \Delta R. \quad (8)$$

Итоговым результатом расчетов по формулам (6) или (8) должно стать накопление банка данных, на основании которых можно было бы получить зависимости типа $p_{eff} = f(V_i)$ или $p_{eff} = f(s)$.

Обсуждение и выводы

Выражения (6) и (8) позволяют по данным натурных измерений определить эффективное давление сжатия корпуса судна. Сравнение этих формул между собой показывает, что p_{eff1} превышает величину p_{eff2} не более чем на 30 %. Формально формула (8) лучше учитывает форму судна, и, казалось бы, ей необходимо отдать предпочтение при анализе данных. Однако решение этого вопроса не столь однозначно.

Основным достоинством формулы (6) является ее простота и возможность применения к любому судну. Необходимо отметить, что после получения эмпирических зависимостей эффективного давления от скорости закрытия канала или степени сжатия при их практическом использовании для расчета скорости движения судна в сжатых льдах необходимо будет использовать ту расчетную схему, для которой были получены зависимости. Здесь может возникнуть некоторая трудность, т. к. не всегда возможно для каждого судна определить среднее значение угла наклона ватерлинии.

Еще одна сложность в применении формулы (8) заключается в ледовых условиях, в которых двигается судно при воздействии на него сжатий. Например, судно может двигаться по каналу, кромки которого смыкаются. В этом случае носовая оконечность практически не взаимодействует со льдом.

Можно, по-видимому, придумать еще ряд примеров, которые бы демонстрировали некорректность применения формулы (8). Поэтому, по мнению авторов, в качестве основной модели необходимо рассматривать схему 1. Эта схема из-за ее простоты подходит практически в любом случае. Здесь необходимо еще раз подчеркнуть, что нельзя рассматривать эффективные давления как некоторые физические величины. Это некий маркер, характеризующий ледовые сжатия и являющийся удобным инструментом для проведения расчетов ледовой ходкости.

Необходимо обратить внимание еще на одну особенность предложенного подхода. Возможность его реализации базируется на использовании диаграмм ледовой ходкости. Теоретически такие диаграммы могут быть построены для любого судна, для которого был выполнен стандартный набор модельных гидродинамических

испытаний в процессе его проектирования. Однако выполнить такую работу специалисты, проводящие наблюдения за динамикой ледяного покрова, скорее всего, не могут. Поэтому здесь необходима кооперация с специалистами-корабелями.

В настоящий момент применение диаграмм ледовой ходкости накладывает существенное ограничение на их использование для изучения ледовых сжатий. Все описанное выше справедливо для случая, когда движители судна интенсивно не взаимодействуют с притопленным корпусом льдом. Другими словами, диаграммами можно пользоваться только в случае, когда экспериментально зафиксированная частота вращения движителей не отличается более чем на 5–6 % от прогнозируемой диаграммами. В противном случае использование диаграмм для определения дополнительного сопротивления пока невозможно. Дело в том, что при интенсивном взаимодействии гребных винтов судна со льдом происходит довольно резкое снижение частоты их вращения из-за действия дополнительного ледового момента сопротивления вращению. Снижение частоты вращения приводит к уменьшению гидродинамической тяги движителей. Однако при интенсивном воздействии льда на винт возникает «ледовая тяга», которая частично компенсирует потери тяги гидродинамической [18]. В настоящее время существующие диаграммы этот факт не учитывают, хотя работа над их совершенствованием ведется. Поэтому для анализа воздействия ледовых сжатий на судно пока должны использоваться только те данные, которые получены при отсутствии существенного снижения частоты вращения движителей.

Авторы выражают надежду, что описанный подход и/или возможные его модификации будут использованы для анализа плавания судов в сжатых льдах. Что будут получены важные эмпирические зависимости $p_{eff} = f(V_i)$ или $p_{eff} = f(s)$ и это откроет возможность улучшить качество расчетов морских транспортных систем.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00039, «Теоретические основы и прикладные инструменты для создания системы интеллектуального планирования работы флота и поддержки принятия решений в арктическом судоходстве», <https://rscf.ru/project/23-19-00039/>.

Competing interests. The authors declares that there is no conflict of interest.

Funding. The study was carried out with the support of the Russian Science Foundation grant No. 23-19-00039, “Theoretical foundations and applied tools for creating a system of intelligent fleet planning and decision support in Arctic shipping”, <https://rscf.ru/project/23-19-00039/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике.* Миронов Е.У. (ред.). СПб.: ГНЦ РФ ААНИИ; 2010. 320 с.
2. Li F., Kujala P., Montewka J. A ship in compressive ice: an overview and preliminary analysis. In: *Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic conditions.* POAC, 2019. June 9–13, 2019, Delft, The Netherlands. URL: <https://www.poac.com/Papers/2019/pdf/POAC19-068.pdf> (accessed: 25.12.2024).
3. Таровик О.В. Модели для прогнозирования параметров рейсов судов в Арктике: существующие подходы и возможные пути развития. *Арктика: экология и экономика.* 2021;11(3):422–435. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-422-435>
Tarovik O.V. Models for forecasting parameters of ship voyages in the Arctic: existing approaches and possible development paths. *Arktika: Ekologiya i Ekonomika = Arctic: ecology and economics.* 2021;11(3):422–435. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-422-435>

4. Li F., Goerlandt F., Kujala P., Lehtiranta J., Lensu M. Evaluation of selected state-of-the-art methods for ship transit simulation in various ice conditions based on full-scale measurement. *Cold Regions Science and Technology*. 2018;151:94–108. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.03.008>
5. Lu L., Kujala P., Toivola J., Helena J., Kuikka S. New approach to determine equivalent ice thickness for ships in dynamic compressive ice. In: *Proceedings of the 27th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. 12–16 June 2023, Glasgow, United Kingdom. URL: https://www.poac.com/Papers/2023/pdf/Paper83_Lu.pdf (accessed: 25.12.2024).
6. Бузин И.В., Клячкин С.В., Фролов С.В., Смирнов К.Г., Михальцева С.В., Соколова Ю.В., Гудошников Ю.П., Войнов Г.Н., Григорьев М.Н. Некоторые оценки тяжелых ледовых условий в Печорском море по данным наблюдений и моделирования (природное явление и его влияние на морские операции). *Арктика: экология и экономика*. 2022;12(4):500–512. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-4-500-512>
Buzin I.V., Klyachkin S.V., Frolov S.V., Smirnov K.G., Mikhaltceva S.V., Sokolova Yu.V., Gudoshnikov Yu.P., Voinov G.N., Grigoryev M.N. Some assessments of severe ice conditions in the Pechora Sea based on observations and modeling (natural phenomenon and its impact on marine operations). *Arktika: Ekologia i Ekonomika = Arctic: ecology and economics*. 2022;12(4):500–512. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-4-500-512>
7. Казаков А.Т. *Безопасная дистанция и выбор оптимальной скорости при ледокольной проводке*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1986. 24 с.
8. Сазонов К.Е. *Модельный и натурный эксперимент в морской ледотехнике*. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; 2021. 306 с.
9. Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Клейн А.Э. Методика расчета скорости сложения канала в ледяном покрове по данным телевизионных снимков. *Метеорологический вестник*. 2010;3(2):12–29.
Tretyakov V.Yu., Frolov S.V., Klein A.E. Methodology for calculating the rate of channel formation in ice cover based on television images. *Meteorologicheskij vestnik = Meteorological Bulletin*. 2010;3(2):12–29. (In Russ.)
10. Миронов Е.У., Клячкин С.В., Смоляницкий В.М., Юлин А.В., Фролов С.В. Современное состояние и перспективы исследований ледяного покрова морей российской Арктики. *Российская Арктика*. 2020;10:13–29. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12102>
Mironov E.U., Klyachkin S.V., Smolyanitsky V.M., Yulin A.V., Frolov S.V. Current state and prospects for research of the ice cover of the seas of the Russian Arctic. *Rossiyskaya Arktika = Russian Arctic*. 2020;10:13–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12102>
11. Assur A. Problems in ice engineering. In: Frankenstein G.E. (ed.) *Proceedings of the 3rd IAHR International Symposium on ice problems, 18–21 August, 1975, Hanover, New Hampshire*. Hanover, New Hampshire, USA: International Association of hydraulic Research, Committee on Ice Problems; 1975. P. 361–372. URL: <https://www.iahr.org/library/technical?pid=520> (accessed: 25.12.2024).
12. Тимохов Л.А., Хейсин Д.Е. *Динамика морских льдов. Математические модели*. Л.: Гидрометеониздат; 1987. 272 с.
13. Suominen M., Kujala P. Ice model tests in compressive ice. In: Li and Lu (ed.). *Proceedings of the 21st IAHR International Symposium on Ice, Ice Research for Sustainable Environment, Dalian, China, June 11–15, 2012*. Dalian: Dailan University of Technology Press; 2012. P. 1046–1057. URL: <https://www.iahr.org/library/infor?pid=27016> (accessed: 25.12.2024).
14. Külaots R., Kujala P., von Bock und Polach R., Montewka J. Modelling of ship resistance in compressive ice channels. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, June 9–13, 2013, Espoo, Finland. URL: https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_180.pdf (accessed: 25.12.2024).

15. La Prairie D., Wilhelmson V., Riska K. *A transit simulation model for ships in Baltic ice conditions, documentation of the calculation routing*. Otaniemi: Helsinki University of Technology; 1995. 38 p.
16. Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Сазонов К.Е. *Прогнозирование характеристик ходкости многовальных судов*. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; 2019. 160 с.
17. Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Сазонов К.Е. Диаграммы ледовой ходкости судна. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2022;14(6):805–814. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2022-14-6-805-814>
Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Sazonov K.E. Ice performance diagrams of a vessel. *Bulletin of the Admiral S.O. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova = Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*. 2022;14(6):805–814. (In Russ.). <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2022-14-6-805-814>
18. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Применение диаграмм ледовой ходкости судов для анализа натурных испытаний. *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2023;3(405):81–88. <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2023-3-405-81-88>
Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Application of ice performance diagrams of ships for analysis of full-scale tests. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra = Proceedings of the Krylov State Research Center*. 2023;3(405):81–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2023-3-405-81-88>
19. Лосет С., Шхинек К.Н., Гудмestad О., Хойланд К. *Воздействие льда на морские и береговые сооружения*. СПб.: Лань; 2010. 272 с.