




УДК 629.5.073.4  
EDN: LNBMGQ

А.А. Добродеев<sup>1, 2</sup> , К.Е. Сазонов<sup>1, 2</sup> , И.А. Свистунов<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕДОВЫХ СЖАТИЙ НА ЛЕДОВУЮ ХОДКОСТЬ СУДОВ

**Объект и цель научной работы.** Объектом является обзор исследований по изучению влияния ледовых сжатий на ледовую ходкость судна. Основные цели состоят в анализе научных работ, выполненных в данном направлении, и выявлении перспективных направлений изучения этого опасного ледового явления с точки зрения его влияния на судоходство в замерзающих морях.

**Материалы и методы.** Анализ данных литературных источников и материалов научно-исследовательских работ.

**Основные результаты.** Приведенные в статье материалы позволяют выделить основные направления изучения влияния ледовых сжатий на судоходство в замерзающих морях и наметить пути дальнейших исследований.

**Закключение.** В работе приведен обзор исследований по изучению влияния ледовых сжатий на характеристики ледовой ходкости судов. Для развития этого направления морской ледотехники необходимы экспериментальные исследования как в натуральных условиях, так и в ледовых бассейнах. В натуральных условиях требуется, используя современные методы измерений и расчетов, эффективное ледовое давление сжатий на корпус движущегося судна. В области модельного эксперимента насущными задачами являются разработка приемов проведения эксперимента в традиционных по форме в плане бассейнах в целях снижения их трудоемкости и повышения эффективности, а также разработка новых методов эксперимента, позволяющих проводить исследования воздействия ледовых сжатий на модель не только в сплошных, но и в мелко- и крупнобитых льдах. Важным представляется определение эффективного давления ледовых сжатий в модельном эксперименте.

**Ключевые слова:** ледовые сжатия, дополнительное ледовое сопротивление, ледовая ходкость, ледовый бассейн, натурные испытания.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

UDC 629.5.073.4  
EDN: LNBMGQ

A.A. Dobrodeev<sup>1, 2</sup> , K.E. Sazonov<sup>1, 2</sup> , I.A. Svistunov<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

## EFFECT OF ICE COMPRESSIONS UPON PROPULSION PERFORMANCE OF ICE-GOING SHIPS

**Object and purpose of research.** This paper reviews available publications on the effect of ice compressions upon propulsion performance of ice-going ships. The main purposes of the authors were to analyse the state of the art in this field and identify promising areas of further studies with respect to this hazardous ice phenomenon in terms of its effect upon ship traffic in freezing waters.

**Materials and methods.** Analysis of available literature and research papers.

**Main results.** The materials discussed in this paper make it possible to identify the main areas of research in terms of ice compression effects upon ship traffic in freezing waters, as well as to trace the paths for further studies.

*Для цитирования:* Добродеев А.А., Сазонов К.Е., Свистунов И.А. Изучение влияния ледовых сжатий на ледовую ходкость судов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2025; 4(414): 33–46.

*For citations:* Dobrodeev A.A., Sazonov K.E., Svistunov I.A. Effect of ice compressions upon propulsion performance of ice-going ships. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2025; 4(414): 33–46 (in Russian).

**Conclusion.** This paper reviews the state of the art in the research of ice compression effects upon propulsion performance of ice-going ships. Further progress in this field of marine engineering will require both model tests in ice basins and full-scale trials in field conditions. With respect to field studies, it is necessary to employ modern methods of measurements and calculations to determine effective pressure exerted by ice compressions on moving ships. In terms of model tests, relevant tasks are development of testing techniques for ice basins of conventional planform (to make these tests less tedious and more efficient) and development of new test methods enabling the research of ice compression effects on models not only in level ice conditions but also in broken ice. An important task is determination of effective pressure for ice compressions in model experiments.

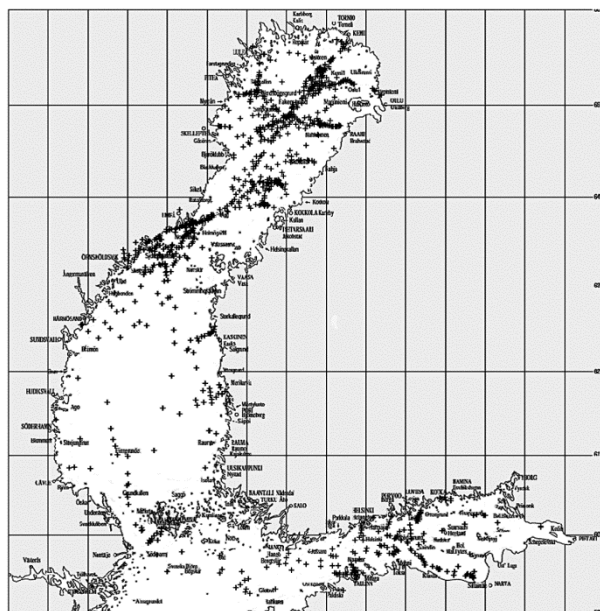
**Keywords:** ice compressions, added ice resistance, ice propulsion performance, ice basin, full-scale trials.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

Ледовые сжатия относятся к опасным ледовым явлениям [1]. Причина возникновения ледовых сжатий заключается в неравномерности дрейфа льда (различие в скорости и направлении) на замерзающих акваториях. В такой ситуации дрейфующие льдины взаимодействуют друг с другом, результирующее давление этого взаимодействия направлено горизонтально. Ледовые сжатия могут возникать только при высокой, обычно более 7 баллов, сплоченности ледяного покрова. Важным условием для возникновения сжатий является наличие естественных препятствий дрейфу льда: береговой кромки, островов, стамух, припая и пр. Ледовые сжатия являются распространенным при-



**Рис. 1.** Карта ледовых сжатий, зафиксированных в Балтийском море зимой 2010/2011 гг. [2]

**Fig. 1.** Map of ice compressions in the Baltic Sea as of winter 2010/2011 [2]

родным явлением на замерзающих акваториях. В качестве примера на рис. 1 приведена карта Балтийского моря, где крестиками отмечены места фиксации ледовых сжатий.

Наиболее сильное влияние ледовые сжатия оказывают на судоходство в арктических и других замерзающих морях. Уже первые исследователи Арктики (Ф. Нансен, Ю. Пайер, К.С. Бадигин и др.) оставили подробные описания этого явления. В работе [3] приведены два случая возникновения сильных сжатий в Печорском море и оценено их влияние на судоходство. Ледовые сжатия часто становились причиной повреждения или даже гибели судов. Этот аспект изучается в ледовой прочности судов [4–6 и др.] и здесь рассматриваться не будет.

Несмотря на важное влияние, которое оказывают ледовые сжатия на судоходство во льдах, нельзя констатировать, что это явление природы изучено достаточно хорошо. Если в области физико-географического описания ледовых сжатий наблюдается некоторый прогресс, заключающийся в активном использовании для их изучения новых технических средств (например, привлечение спутниковых данных, применение математических моделей дрейфа ледяного покрова), то при изучении характера воздействия ледовых сжатий на суда серьезных достижений пока не наблюдается.

Недавно финские специалисты опубликовали работу, в которой подчеркивается, 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 [7, 8].

В настоящей работе авторы предприняли попытку проанализировать выполненные исследования по изучению воздействия ледовых сжатий на суда, оценить уровень достигнутых результатов и наметить пути развития.

## 1. Методы определения ледовых сжатий

### 1. Methods of ice compression assessment

Определение наличия ледовых сжатий в ледяном покрове представляет собой весьма сложную задачу. Как правило, опытные гидрологи определяют их на глаз, по ряду сопутствующих признаков, наиболее яркие из которых – наслоение и торошение льда. Этому часто препятствует тот факт, что в направлении, перпендикулярном действию сжатия, могут возникать трещины и разрывы сплошности льда. Для определения сжатия льда используется 3-балльная шкала, приводимая в табл. 1 [9].

Как следует из таблицы, для определения наличия сжатия и его интенсивности используются исключительно признаки особенностей состояния ледовой среды. Однако часто для этого анализируется поведение судна. Достаточно выявить наличие сжатия, наблюдая за характером

закрытия ледяного канала за судном. Степень и скорость закрытия канала могут дать информацию об интенсивности сжатия. Существует эмпирическая зависимость между скоростью закрытия канала и степенью сжатия льда, которую предложил А.Т. Казаков. Эта зависимость представлена в табл. 2 [10].

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

$$V_p = 0,005s + 0,03762s^2, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где  $V_p$  – скорость закрытия канала,  $s$  – степень сжатия льда в баллах.

Для регистрации скорости закрытия канала в условиях сжатия льда специалисты ААНИИ разработали и внедрили специализированную телевизионную систему [11, 12]. Однако в опубликованных источниках до сих пор нет информации о ее использовании.

**Таблица 1.** Шкала интенсивности сжатий

**Table 1.** Scale of ice compression intensity

Балл	Характеристика
0	Лед на «расплыве» – лед сплоченностью 9–10 баллов, пришедший в заметное движение при начавшемся разряжении
1	Слабое сжатие. В зоне сжатия наблюдаются небольшие участки чистой воды; образуются отдельные торосы взлома, а в молодом льду – наслоения. Тертый лед в результате общего уплотнения выжимается кверху, на края льдин
2	Значительное сжатие. В зоне сжатия участки свободной воды закрываются. Торосы взламываются. В результате интенсивного торошения молодых льдов частично захватываются и однолетние льды, появляются свежие торосы в виде гряд и наслоений. Тертый лед набивается в плотный слой и выпучивается, образуя валы
3	Сильное сплошное сжатие. Происходит интенсивное торошение однолетних льдов, частично захватывающее двухлетние и многолетние. Всюду наблюдаются валы тертого льда и гряды торосов. Молодой лед преимущественно всторощен

**Таблица 2.** Скорость закрытия канала за ледоколом в зависимости от степени сжатия ледяного покрова

**Table 2.** Time of channel closing behind the icebreaker vs ice compression intensity

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

**Таблица 3.** Шкала интенсивности сжатий, применяемая в Финляндии и Швеции

**Table 3.** Scale of ice compression intensity used in Finland and Sweden

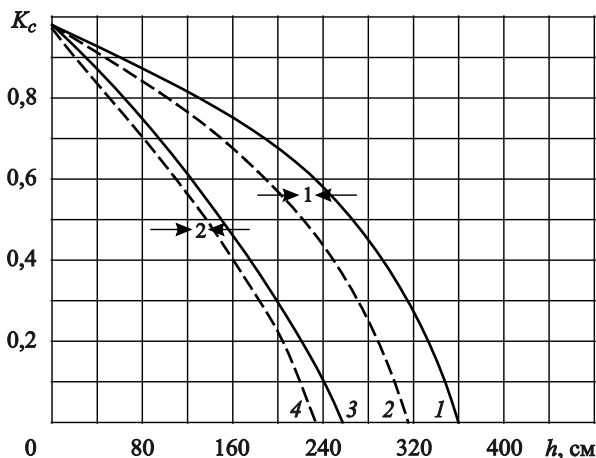
Баллы	Уровень давления	Особенность 1	Особенность 2
1	Легкое давление	Судно прошло более 0,5 морских миль до закрытия канала	Буксировочная помощь не требуется
2	Умеренное давление	Судно прошло менее 0,5 морских миль до закрытия канала	Более слабые/меньшие суда должны быть отбуксированы
3	Сильное давление	Канал закрывается немедленно	Все суда должны быть отбуксированы
4	Серьезное давление	Даже ледоколы испытывают трудности	Движение прервано / должно быть прервано

В Финляндии и Швеции применяется другая шкала для описания ледовых сжатий (табл. 3) [13]. Она основана исключительно на анализе поведения судна в сжатых льдах.

## 2. Теоретические и полумпирические исследования влияния сжатий на ледовое сопротивление

### 2. Theoretical and semi-empirical studies of ice compression effect upon ice resistance

Изучение влияния ледовых сжатий на характеристики ледовой ходкости судов проводилось в СССР



**Рис. 2.** Коэффициент уменьшения скорости движения а/л «Арктика» при сжатии льда различной толщины в летний период: →1←, →2← – сжатие в баллах (1, 3 – при движении в ледяных полях; 2, 4 – при движении в обломках полей и битых льдах) [15]

**Fig. 2.** Coefficient of nuclear icebreaker *Arktika* speed decrease due to compressions by ice of different thickness in summer period: →1←, →2← – ice compression score (1, 3 – navigation in level ice; 2, 4 – navigation in medium floes and broken ice) [15]

в рамках исследований ледяного покрова как среды для судоходства. В основном это был сбор информации об изменении скорости движения судна при наличии и отсутствии ледовых сжатий.

Количественная оценка влияния ледовых сжатий на уменьшение скорости движения судов во льдах выполнялась с помощью коэффициента сжатия  $K_c = V_{sc}/V_s$ , где  $V_{sc}$  – скорость судна при наличии ледовых сжатий,  $V_s$  – скорость судна без ледовых сжатий. Характерный пример зависимости указанного коэффициента от толщины льда применительно к а/л типа «Арктика» (проект 1052) показан на рис. 2. Результаты этих исследований обобщены в монографиях [14, 15].

По-видимому, одной из первых попыток полумпирического описания воздействия ледовых сжатий на судно стала разработка А.Я. Рывлиным метода расчета ледового сопротивления судна, движущегося в битых льдах [16]. Он отнес воздействие ледового сжатия на корпус судна к разновидности статического сопротивления, которое не зависит от скорости движения, и описал его так же, как обычное статическое сопротивление, проявляющееся в упругом действии слоя битого льда на носовую оконечность судна. Различие заключалось только в том, что ледовые сжатия действовали на корпус по всей его длине, а упругость ледяного слоя была заменена неким коэффициентом сопротивления сжатию  $\bar{q}$ , который зависел от характеристик ледяного покрова.

Для исключения этого влияния данный коэффициент был представлен в виде  $\bar{q} = \bar{k}_4 \rho_l g s \sqrt{rh}$ , где  $\rho_l$  – плотность льда,  $r$  – протяженность льдин,  $h$  – толщина льда. Кроме этого, введено предположение, что коэффициент  $\bar{q}$  линейно зависит от силы сжатия  $s$ , выраженной в баллах. В результате для дополнительного ледового сопротивления, связан-

ного с действием ледовых сжатий, получено следующее выражение:

$$\Delta R = \bar{k}_4 \bar{\rho}_l g \sqrt{rh} f_l \alpha \left( \frac{B}{2} \right)^2 \frac{L}{B} s, \quad (2)$$

где  $f_l$  – коэффициент трения льда об обшивку корпуса,  $\alpha$  – коэффициент полноты ватерлинии,  $L$  и  $B$  – длина и ширина судна. Параметр  $rh$  может быть определен по формуле:

$$rh = 0,0114 + 0,453h_l + 0,5429h_l^2. \quad (3)$$

В 1975 г. появилась теоретическая работа американского исследователя А. Ассура [17], в которой предпринималась попытка определить дополнительную силу сопротивления, возникающую на корпусе судна при ледовых сжатиях. Он получил формулу для определения этого сопротивления в предположении, что дополнительная сила воздействует по цилиндрической вставке судна  $L_p$ :

$$\Delta R = 2f_l(\sigma_0 + \sigma)L_p h, \quad (4)$$

где  $\sigma_0 = 8$  кПа – эмпирический коэффициент,  $\sigma$  – напряжение сжатия в ледяном покрове,  $h$  – толщина льда.

Использование встречает определенные трудности, т.к. значения напряжений сжатия в ледяном покрове неизвестны, а имеются данные лишь о баллах сжатия. Связь между баллами сжатия и соответствующими напряжениями ряд авторов пытался получить из анализа результатов расчетов дрейфа льда с помощью математических моделей [18] (табл. 4). Очевидно, что большой диапазон изменчивости этих данных препятствует их использованию при проведении расчетов ледовой ходкости.

Определенное продвижение в теоретическом описании воздействий ледовых сжатий на движущееся судно был достигнут в конце XX в. финскими и российскими исследователями, в т.ч. при выполнении совместного исследовательского проекта. В рамках этого проекта в ледовом бассейне Уни-

верситета Аалто (Финляндия) был выполнен ряд исследований, анализ которых позволил предложить методику расчета дополнительного сопротивления, возникающего при сжатии льдов [19]. Она основывается на предположениях о перпендикулярности действия ледовых сжатий направлению движения судна и о наличии у судна цилиндрической вставки с прямым бортом. Расчет дополнительного сопротивления, возникающего от действия ледовых сжатий, осуществляется по следующим формулам:

$$P_n = P_0 \left\{ 1 - \frac{0,975hV_s^{2/3}}{L_p V_i} \left[ \left( \frac{E}{\rho} \right)^{1/2} \frac{\sigma_f}{\sigma_c} \right]^{1/3} \right\},$$

$$\Delta R_\alpha = 2,5P_n \sin \left( \arctg \frac{V_s}{V_i} \right),$$

$$\Delta R_{fr} = P_n f_{ID},$$

$$\Delta R = \Delta R_\alpha + \Delta R_{fr},$$

$$R_I = (1 + \Delta R)R_{level}$$

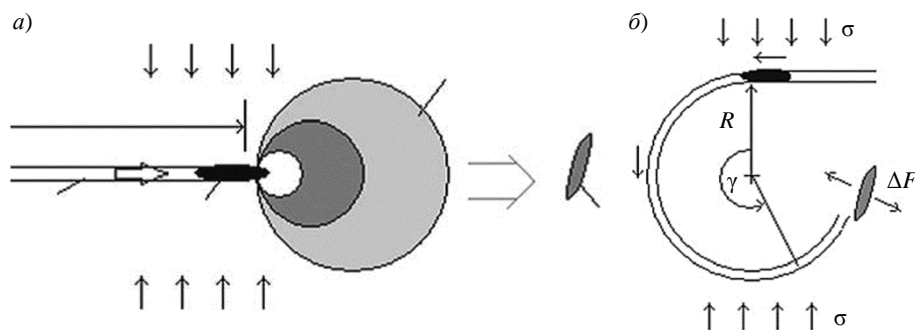
В этих формулах  $V_s$ ,  $V_i$  – скорости судна и льда соответственно;  $L_p$  – длина цилиндрической вставки;  $E$  – модуль упругости льда;  $\sigma_f$ ,  $\sigma_c$  – прочность льда на изгиб и смятие;  $\rho$  – плотность льда;  $\Delta R_\alpha$ ,  $\Delta R_{fr}$  – составляющие дополнительного сопротивления (первая связана с непосредственным давлением на носовое заострение, вторая – с трением по цилиндрической вставке).  $P_0 = 1$  в случае, если судно потеряло ход из-за действия сжатий. По оценке авторов работы [18], полученные соотношения должны рассматриваться лишь как первое приближение к решению задачи.

Российскими исследователями под руководством члена-корреспондента РАН Р.В. Гольдштейна выполнены работы по изучению возможности использования положений механики трещин для описания движения судов во льдах, в т.ч. сжатых [20, 21]. Ученые выяснили многие интересные эф-

**Таблица 4.** Шкала перехода от среднего нормального напряжения к степени сжатия льда

**Table 4.** Scale of transition from average normal stress to ice compression intensity

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



**Fig. 3.** Procedure of icebreaker approach to a ship or an ice-resistant platform in compact ice:  
 a) dangerous approach scenario; b) recommended approach scenario. As the icebreaker turns by angle  $\gamma \geq 90^\circ$ , ice compression in the vicinity of the object vanishes.  $\Delta F$  – direction of the forces compensating ice compression [21]

**Рис. 3.** Действия ледокола при подходе к судну или ледостойкой платформе в сжатых льдах:  
 а) опасный вариант сближения; б) рекомендуемая тактика. При циркуляции на угол  $\gamma \geq 90^\circ$  сжатие в районе объекта прекращается.  $\Delta F$  – направление сил, компенсирующих сжатие [21]

факты, связанные с трещинообразованием в ледяном покрове, рассмотрели возможности оптимизации маршрутов движения ледокола в сжатых льдах. На рис. 3 приведена иллюстрация из работы [21], на которой показан оптимальный маршрут подхода ледокола для околки застрявшего во льдах судна в условиях сжатий.

Важным направлением исследований воздействий ледовых сжатий на ледовую ходкость судов стало изучение влияния сжатий на показатели и тактические приемы проводки судов ледоколами. Различным аспектам этой проблемы посвящены работы специалистов, занимающихся как эксплуатацией судов в ледовых условиях [9, 22], так и их проектированием [23–26]. В работе [23] получено условие возможности проводки ледоколом одиночного судна при действии сжатий,

которое легко обобщается на проводку каравана судов:

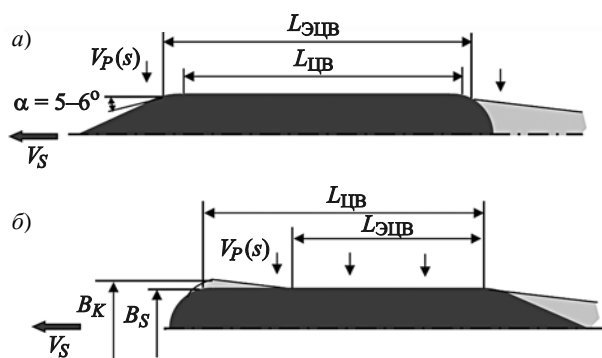
$$\frac{B_I - B_S}{2V_P(s)} \geq \frac{l + L_S}{V_S}, \quad (6)$$

где  $B_I$  – ширина ледокола;  $B_S$  – ширина судна;  $l$  – расстояние между кормой ледокола и носом проводимого судна на уровне воды;  $L_S$  – длина судна по ватерлинии;  $V_S$  – скорость судна. В этой же работе рассмотрены условия, при выполнении которых возможна околка застрявшего во льдах крупнотоннажного судна одним ледоколом.

В работе [25] выполнена оценка снижения скорости движения судна по ледяному каналу в случае, когда его кромки под действием ледовых сжатий смыкаются, приводя к частичному взаимодействию бортов со льдом. В работе [26] оценивается вероятность заклинивания судна, которое проводят два ледокола в сжатых льдах. Аналогичные исследования проводятся также и зарубежными исследователями [27, 28].

В работе [29] рассматривается влияние ледовых сжатий на крупнотоннажное судно, оборудованное винторулевыми колонками, которое движется кормой вперед. По мнению автора, такой режим движения позволяет несколько снизить отрицательное влияние ледовых сжатий. Эффект заключается в уменьшении длины эквивалентной цилиндрической вставки, взаимодействующей со льдом (рис. 4).

Как считает автор, уменьшение длины  $L_{ЭЦВ}$  происходит из-за того, что струи воды от винторулевых колонок, повернутых на небольшой угол поворота по отношению к диаметральной плоскости судна, разрушают и размывают кромки ледяного канала, уменьшая зону контакта с корпусом. В [29] утверждается, что такой эффект наблюдался при



**Рис. 4.** Схема определения протяженности воздействия ледового сжатия (длины эквивалентной цилиндрической вставки) на корпус судна на режимах переднего (а) и заднего (б) хода [29]

**Fig. 4.** Procedure for determination of ice compression length, i.e. the length of equivalent parallel middlebody of the ship moving ahead (a) and astern (b) [29]

эксплуатации транспортных судов типа «Норильский никель», а также в модельном эксперименте, проведенном в Гамбургском ледовом бассейне.

Не исключая возможность наличия этого эффекта, авторы настоящей работы считают, что движение кормой вперед в условиях ледовых сжатий не может оказать существенного влияния на повышение показателей ледовой ходкости из-за того, что разрушение и размыв кромок струями от колонок возможны только в относительно тонких льдах. Кроме этого при увеличении интенсивности сжатий эффект должен снижаться. Последнее утверждение подтверждается данными работы [29], в которой констатируется, что эффект от действия струй наблюдается при небольших напряжениях сжатия.

### 3. Экспериментальные исследования

#### 3. Experimental studies

Наибольшее количество экспериментальных исследований по изучению воздействий ледовых сжатий на суда выполнено в ледовых бассейнах. Проводившиеся там эксперименты можно разбить на две большие группы.

В первую группу попадают исследования, направленные на изучение механики взаимодействия ледяного покрова с вертикальной или наклонной стенкой. Это важно для решения вопросов ледовой прочности судов и, как правило, относится к случаю неподвижного затертого льдами судна. Такие эксперименты в данной работе рассматриваться не будут.

Вторая группа экспериментов имеет непосредственное отношение к ледовой ходкости судов, т.к. в этих экспериментах изучалось воздействие сжатого льда на движущееся судно. Обычно при проведении исследований проводятся опыты двух разновидностей. В первом случае модель движется в сплошном ледяном покрове, прокладывая канал, к которому приложены сжимающие усилия. Во втором случае движение модели судна осуществляется по проложенному заранее каналу, кромки которого смыкаются. Необходимо подчеркнуть, что практически все эксперименты проводятся в сплошном ровном льду.

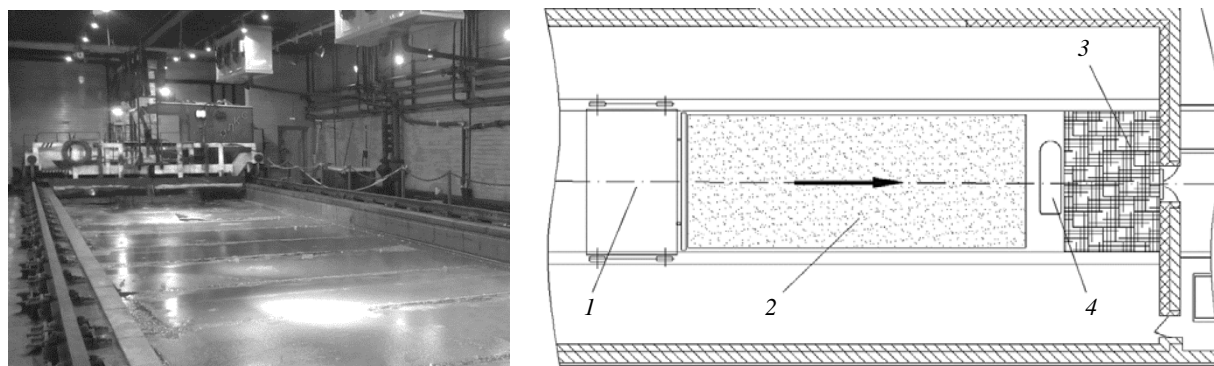
Модельные испытания, относящиеся к первой группе, в основном выполнялись с целью определения закономерностей распределения локального давления на борт судна для обеспечения его ледовой прочности. При этом большое внимание уделялось процессам разрушения ледяного покрова при его контакте с корпусом судна, а также формирова-

нию ледяных нагромождений у борта [27, 30, 31]. Подавляющее большинство экспериментов выполнено в ледовом бассейне Университета Аалто.

Относительно недавно в ледовом бассейне ААНИИ (Россия) был выполнен большой объем испытаний по воздействию сжатого дрейфующего льда на стоящее судно [32, 33]. Испытания проводились в обеспечение процесса проектирования исследовательской платформы «Северный полюс». Целью этих работ было выявление особенностей поведения исследовательской платформы, находящейся в режиме дрейфа, при воздействии на нее ледовых сжатий. Важной задачей являлось определение кренящего момента, который воздействует на платформу при достаточно продолжительных сжатиях, т.к. большая величина момента могла привести к возникновению опасных углов крена платформы. Кроме этого важно было определить всплытие платформы, вызванное сжатиями.

При проведении экспериментальных исследований модель платформы располагалась у одного из торцов ледового бассейна, где был создан слой утолщенного льда, а на нее с помощью буксирочной тележки надвигался неразрушенный моделированный ледяной покров (рис. 5).

В работе [32] детально описывается физическая картина взаимодействия неподвижного судна с надвигающимся льдом, которую автор разбивает на четыре основных этапа (рис. 6). С самого начала контакта корпуса платформы с дрейфующим полем моделированного льда начинается вытеснение модели в вертикальном направлении (рис. 6а), т.к. платформа имеет наклонный борт по всей длине ватерлинии. В какой-то момент происходит разрушение ледяного покрова изгибом, что приводит к резкому изменению осадки (притапливанию), а также накрению в сторону разрушившегося лед борта (рис. 6б). Продолжающийся дрейф льда обуславливает притапливание образовавшихся обломков и возникновение контакта борта с неразрушенным ледяным покровом. Описанный выше процесс повторяется. Через некоторое время подводное нагромождение льда достигает достаточно большой величины и начинает распространяться под днище платформы (рис. 6в). В дальнейшем подводное нагромождение распространяется и на противоположный борт, что делает подводную часть платформы полностью погруженной в ледяное нагромождение (рис. 6г). Описанный процесс является нестационарным, он сопровождается продольными и поперечными колебаниями, а также возникновением дифферента.



**Рис. 5.** Схема проведения модельного эксперимента по ледовым сжатиям платформы:  
 1 – буксировочная тележка; 2 – поле моделированного льда; 3 – утолщенное поле моделированного льда;  
 4 – модель платформы [32]

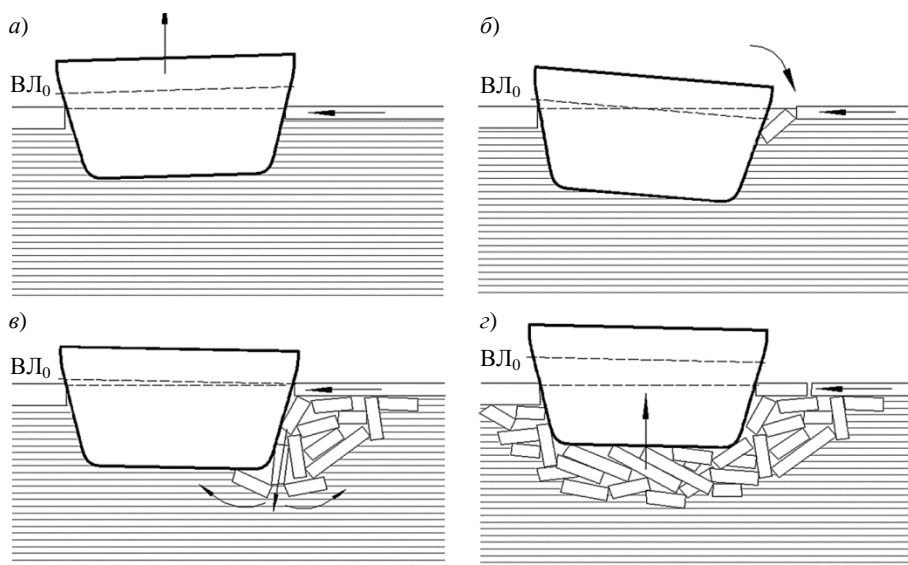
**Fig. 5.** Model test setup for ice compression effect upon an offshore platform:  
 1 – towing carriage; 2 – model ice sheet; 3 – thickened model ice sheet; 4 – platform model [32]

В рассматриваемой работе подробно описана методика проведения эксперимента, выполнение которой позволило автору определить кренящий момент с учетом изменений метацентрической высоты, происходящих из-за плавучести подводных ледяных образований, возникновение которых вызвано дрейфом льда и колебательным процессом взаимодействия корпуса модели со льдом.

В работе [33] И.А. Свистунов предлагает оригинальную экспериментально-теоретическую методику определения глобальной ледовой нагрузки на исследовательскую платформу. Непосредственное определение глобальной ледовой нагрузки в эксперименте было невозможно, т.к. наличие динамометрической аппаратуры лишило бы модель плат-

формы возможности перемещаться, что исказило бы картину ее взаимодействия со льдом. Предложенная методика базируется на измерении перемещений модели при взаимодействии со сжатым льдом, на основании которых методами теории корабля выполняется расчет действующих усилий.

Результаты, полученные в ледовом бассейне ААНИИ, подтверждены измерениями, выполненными в первом арктическом рейсе платформы «Северный полюс» [34]. В этой работе подробно описана методика выполнения натурных измерений на платформе и приведены полученные результаты. Можно надеяться, что дальнейшее проведение натурных исследований на платформе «Северный полюс» позволит набрать достаточное количество



**Рис. 6.** Основные этапы взаимодействия модели платформы с ледяным полем при сжатии [32]

**Fig. 6.** Main stages of platform model interaction with compact ice sheet [32]

экспериментальной информации и осуществить ее теоретическое обобщение.

Однако для решения задач ледовой ходкости судов наибольший интерес представляют модельные исследования воздействия сжатого льда на движущееся судно. Основным отличием картины взаимодействия судна со сжатым льдом при движении является отсутствие у борта судна значительных ледяных нагромождений, что обуславливает несколько иной характер приложения ледовой нагрузки к корпусу судна. При движении в сплошных льдах или льдах сплоченностью 9–10 баллов со льдом взаимодействует практически вся длина судна по ватерлинии за исключением небольшого участка кормового заострения. При движении же по закрывающему под действием сжатий ледяному каналу основное взаимодействие со льдом приходится на цилиндрическую вставку или ее часть [25].

Наиболее приспособлены для проведения экспериментов по имитации ледовых сжатий ледовые бассейны с близкой к квадратной формой в плане. Большинство модельных исследований выполнено в ледовом бассейне Университета Аалто [2, 35, 36]. В этом бассейне используется надвигание части моделированного ледяного покрова с помощью буксировочной тележки на модель, которая либо покоится, либо движется в направлении, перпендикулярном действию сжатий. Движение модели может осуществляться в самоходном режиме, тогда в эксперименте определяется изменение скорости ее движения, либо она может протаскиваться сквозь лед с помощью специального буксировочного устройства. При этом измеряется дополнительное ледовое сопротивление. На рис. 7 приведена фотография эксперимента, в ходе которого модель буксировалась в поле сжатого льда.

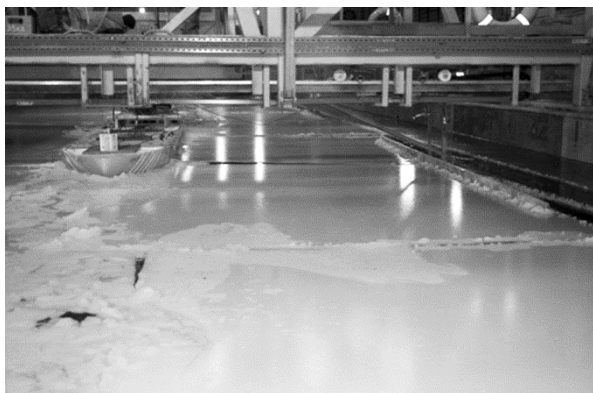
Подобного рода эксперименты проводятся и в ледовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» [10]. Для перемещения относительно небольшого куска льда используется специальная каретка, расположенная на буксировочной тележке (рис. 8). При проведении эксперимента скорость закрытия канала перед моделью рассчитывается в соответствии с выражением (1).

По мнению авторов статьи, основным недостатком описанных выше экспериментов является практическая невозможность проведения модельных испытаний в мелко- и крупнобитых льдах, которые являются наиболее типичными ледовыми условиями в замерзающих морях и в которых вероят-



**Рис. 7.** Испытания по буксировке модели в сжатых льдах в бассейне Университета Аалто [36]

**Fig. 7.** Model towing tests in compact ice at Aalto university ice basin [36]



**Рис. 8.** Движение модели в сжатых льдах в бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

**Fig. 8.** Model tests in compact ice at the Ice Basin of Krylov State Research Center

ность возникновения ледовых сжатий велика [37]. Еще одним минусом этих методов являются большие технические трудности при проведении экспериментов по имитации сжатий в стандартных ледовых бассейнах.

## Заключение

### Conclusion

Из вышеизложенного следует, что изучение влияния ледовых сжатий на ходкость судов во льдах сосредоточено в трех основных направлениях:

1. создание расчетных методик определения дополнительного ледового сопротивления;

2. натурные исследования изменения скорости движения судна в зоне ледовых сжатий;
3. модельный эксперимент в ледовых бассейнах.

По мнению авторов, в настоящее время возможность создания новых расчетных методик по определению характеристик ходкости судна в сжатых льдах весьма ограничена. Это связано с тем, что для определения силового воздействия сжатий на корпус судна необходимо иметь информацию о напряжениях в дрейфующем ледяном покрове. По-видимому, в ближайшей перспективе выполнение таких измерений в натуральных условиях практически неосуществимо. Имеется только возможность измерения кинематических характеристик ледовых сжатий (скорость закрытия канала за судном) [11, 12]. Пока не имеется способов перехода от измеренных кинематических характеристик к силовым и, следовательно, возможности развития расчетных схем.

Для развития этого направления морской ледотехники необходимы экспериментальные исследования как в натуральных условиях, так и в ледовых бассейнах. Одно из возможных направлений развития натуральных исследований предложено в работе авторов данной статьи [38]. Суть в том, чтобы рассматривать эффективное давление ледовых сжатий, которое можно определить с помощью современных методов расчета тяги движительного комплекса судна [39, 40].

Определенное таким образом эффективное давление не является напряжениями сжатия в ледяном покрове, хотя и связано с ними. Это давление должно рассматриваться как индикатор происходящих процессов. В результате определения эффективного давления сжатий и измерений скорости закрытия канала появляется возможность установления взаимосвязи между этими характеристиками. Получение таких зависимостей открывает путь для дальнейшего развития расчетных схем.

В области модельного эксперимента насущной задачей является разработка приемов проведения эксперимента в традиционных по форме в плане бассейнах с целью снижения их трудоемкости и повышения эффективности. Кроме этого актуальной задачей является разработка новых методов эксперимента, позволяющих проводить исследования воздействия ледовых сжатий на модель не только в сплошных, но и в мелко- и крупнобитых льдах. Также важным представляется определение эффективного давления ледовых сжатий в модельном эксперименте.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет грантов 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» (rscf.ru/project/23-19-00039/) и № 25-29-00875 «Разработка методологии исследования ледовых сжатий как проблемы судостроительной и мореходной отраслей на базе дрейфующей ледостойкой платформы “Северный полюс”» (rscf.ru/project/25-29-00875/).

## Список использованной литературы

1. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / [Е.У. Миронов, С.В. Фролов, С.В. Клячкин и др.]. Санкт-Петербург : ААНИИ, 2010. 319 с.
2. Li F., Kujala P., Montewka J. A ship in compressive ice: an overview and preliminary analysis // Proceedings of 25<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC 2019). Red Hook : Curran, 2019. P. POAC19-068 (12 p.).
3. Сжатия ледяного покрова в Печорском море: природное явление и его влияние на морские операции / И.В. Бузин, С.В. Клячкин, С.В. Фролов [и др.] // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12, № 4. С. 500–512. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-500-512.
4. Прочность судов, плавающих во льдах / Ю.Н. Попов, О.В. Фаддеев, Д.Е. Хейсин, А.А. Яковлев. Ленинград : Судостроение, 1967. 224 с.
5. Курдюмов В.А. О нагрузках при сжатии во льдах // Проблемы проектирования корпусных конструкций. Ленинград, 1987. С. 4–10. (Труды ЛКИ ; вып. 218).
6. Антонов Е.М., Нестеров А.Б., Тимофеев О.Я. Регламентация ледовых нагрузок на вертикальный борт при сжатии во льдах // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2008. Вып. 31. С. 129–146.
7. Таровик О.В. Модели для прогнозирования параметров рейсов судов в Арктике: существующие подходы и возможные пути развития // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11, № 3. С. 422–435. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-422-435.
8. Evaluation of selected state-of-the-art methods for ship transit simulation in various ice conditions based on full-scale measurement / F. Li, F. Goerlandt, P. Kujala [et al.] // Cold Regions Science and Technology. 2018. Vol. 151. P. 94–108. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.03.008.
9. Безопасность плавания во льдах / А.П. Смирнов, Б.С. Майнагашев, В.А. Голохвастов, Б.М. Соколов. Москва : Транспорт, 1993. 335 с.
10. Сазонов К.Е. Модельный и натуральный эксперимент в морской ледотехнике. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2021. 306 с.

11. *Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Клейн А.Э.* Методика расчета скорости сжатия канала в ледяном покрове по данным телевизионных снимков // *Метеорологический вестник*. 2010. Т. 3, № 2. С. 12–29.
12. Современное состояние и перспективы исследований ледяного покрова морей российской Арктики / *Е.У. Миронов, С.В. Клячкин, В.М. Смоляницкий* [и др.] // *Российская Арктика*. 2020. № 10. С. 13–29. DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12102.
13. New approach to determine equivalent ice thickness for ships in dynamic compressive ice / *L. Lu, P. Kujala, J. Toivola* [et al.] // *Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'23)*. Red Hook : Curran, 2023. Vol. 2. P. 729–738.
14. *Бузуев А.Я.* Влияние природных условий на судоходство в замерзающих морях. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1981. 200 с.
15. Условия плавания судов во льдах морей Северного полушария / *А.Я. Бузуев, В.Ф. Дубровцев, В.Ф. Захаров, В.И. Смирнов* [Москва]: Гл. упр. навигации и океанографии М-ва обороны СССР, 1988. 280 с.
16. *Капителян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я.* Сопrotивление льда движению судна. Ленинград : Судостроение, 1968. 238 с.
17. *Assur A.* Problems in Ice Engineering // *Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Symposium on Ice Problems*. [S. I.] : IAHR, 1975. P. 361–372.
18. *Тимохов Л.А., Хейсин Д.Е.* Динамика морских льдов. Математические модели. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1987. 272 с.
19. *La Prairie D., Wilhelmsen V., Riska K.* A transit simulation model for ships in Baltic ice conditions, documentation of the calculation routing / Helsinki University of Technology. Otaniemi, 1995. 38 p.
20. *Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М.* Трещиностойкость и разрушение ледяного покрова ледоколами // *Труды ААНИИ*. 1986. Т. 391. С. 137–156.
21. *Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М.* Механика разрушения и проблемы освоения Арктики // *Арктика: экология и экономика*. 2015. № 4(20). С. 14–24.
22. *Казаков А.Т.* Безопасная дистанция и выбор оптимальной скорости при ледокольной проводке : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ленингр. высш. инж. мор. уч-ще им. С.О. Макарова. Ленинград, 1986. 24 с.
23. *Сазонов К.Е.* Проводка крупнотоннажных судов ледоколами в условиях сжатия льда // *Морской вестник*. 2006. № 4(20). С. 83–85.
24. *Sazonov K.E.* Navigation challenges for large-size ships in ice conditions // *Ships and Offshore Structures*. 2011. Vol. 6, No. 3. P. 231–238. DOI: 10.1080/17445302.2010.548123.
25. *Бокатова Е.А., Сазонов К.Е.* Расчет скорости движения судна по ледяному каналу в условиях сжатия при частичном взаимодействии бортов с его кромками // *Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. 2012. Вып. 66(350). С. 43–46.
26. *Апполонов Е.М., Сазонов К.Е., Бокатова Е.А.* О вероятности заклинивания судов при сжатии // *Мир транспорта*. 2012. Т. 10, № 4 (42). С. 4–9.
27. Application of results from the research project 'A ship in compressive ice' to ship operability / *K. Riska, P. Kujala, R. Goldstein* [et al.] // *Proceedings of 13<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'95)*. St. Petersburg, 1995. Vol. 4. P. 84–99.
28. *Lu L., Kujala P., Goerlandt F.* A method for assessing ship operability in dynamic ice for independent navigation and escort operations // *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 225. P. 108830. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108830.
29. *Штрек А.А.* Проектные вопросы маневренности и ходкости при ледовых сжатиях перспективных крупнотоннажных судов арктического плавания // *Морской вестник*. 2013. № 4(48). С. 90–93.
30. A ship in compressive ice. Analysis of the ice failure process : Report from the joint Finnish-Soviet research project : M-165 / *P. Kujala, R. Goldstein, V. Danilenko, N. Osipenko*. Otaniemi, 1993. 70 p.
31. *Kujala P., Ralph S.* Ship in Compressive Ice. Results of model scale tests to study pile-up process of ice : Report from the joint Finnish-Soviet research project : M-191. Otaniemi, 1994. 56 p.
32. *Свиштунов И.А.* Определение кренящего момента, действующего при ледовом сжатии на ледостойкую самоходную платформу «Северный полюс», методом модельных испытаний // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 3(35). С. 97–106. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-97-106.
33. *Свиштунов И.А.* Экспериментально-аналитическая методика определения глобальной ледовой нагрузки от ледовых сжатий на суда и плавучие платформы, используемые в качестве полярных дрейфующих обсерваторий // *Арктика: экология и экономика*. 2023. Т. 13, № 1. С. 85–96. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-85-96.
34. Макромасштабные экспериментальные исследования ледовых сжатий в Северном Ледовитом океане в период первого дрейфа ледостойкой самоходной платформы «Северный полюс» в составе полярной дрейфующей станции «Северный полюс-41» в 2022–2023 гг. / *И.А. Свиштунов, К.В. Фильчук, А.В. Бакланов* [и др.] // *Арктика: экология и экономика*. 2024. Т. 14, № 2. С. 274–285. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-274-285.

35. *Suominen M., Kujala P.* Ice model tests in compressive ice // Proceedings of the 21<sup>st</sup> IAHR International Symposium on Ice. Dalian : Dalian Univ. of Technology, 2012. P. 1046–1057.
36. Modelling of ship resistance in compressive ice channels / *R. Külaots, P. Kujala, von Bock und Polach R., J. Montewka* // Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC 2013). [Curran : Red Hook], 2014. Vol. 2. P. 1295–1305.
37. *Добродеев А.А.* Изучение особенностей движения крупнотоннажных судов в сжатых дрейфующих льдах с использованием методов физического моделирования // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики : материалы XII Всероссийской научной конференции с международным участием. Томск, 2023. С. 236–241.
38. *Сазонов К.Е., Добродеев А.А.* Об определении эффективного давления сжатия льда по данным натурных измерений параметров движения судов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2025. Т. 71, № 1. С. 63–73. DOI: 10.30758/0555-2648-2025-71-1-63-73.
39. *Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Сазонов К.Е.* Прогнозирование характеристик ходкости многовальных судов. Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2019. 156 с.
40. *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. Т. 14, № 6. С. 805–814. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-805-814.
5. *Kurdyumov V.A.* Ice compression loads on ships // Structural Design. 1987. Vol. 218. P. 4–10 (Transactions of Leningrad Shipbuilding Institute) (in Russian).
6. *Appolonov E.M., Nesterov A.B., Timofeev O.Ya.* Assignment of ice compression loads on vertical sides // RS Research Bulletin. 2008. Vol. 31. P. 129–146 (in Russian).
7. *Tarovik O.V.* Models to predict the parameters of ship voyages in the Arctic: existing approaches and possible ways of development // Arctic: Ecology & Economy. 2021. Vol. 11, No. 3. P. 422–435. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-422-435 (in Russian).
8. Evaluation of selected state-of-the-art methods for ship transit simulation in various ice conditions based on full-scale measurement / *F. Li, F. Goerlandt, P. Kujala* [et al.] // Cold Regions Science and Technology. 2018. Vol. 151. P. 94–108. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.03.008.
9. Safety of ice navigation / *A.P. Smirnov, B.S. Mainagashev, V.A. Golokhvastov, B.M. Sokolov.* Moscow : Transport, 1993. 335 p. (in Russian).
10. *Sazonov K.E.* Model and full-scale experiment in marine ice engineering. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2021. 306 p. (in Russian).
11. *Tretyakov V.Yu., Frolov S.V., Klein A.E.* Calculation procedure for ice channel closing as per television imagery data // Meteorological Bulletin. 2010. Vol. 3, No. 2. P. 12–29 (in Russian).
12. State of the art and prospect in ice research of Russian Arctic seas / *E.U. Mironov, S.V. Klyachkin, V.M. Smolyanitsky* [et al.] // Russian Arctic, 2020, No. 10. P. 13–29. DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12102 (in Russian).
13. New approach to determine equivalent ice thickness for ships in dynamic compressive ice / *L. Lu, P. Kujala, J. Toivola* [et al.] // Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'23). Red Hook : Curran, 2023. Vol. 2. P. 729–738.
14. *Buzuev A.Ya.* Effect of environmental conditions upon shipping in freezing seas. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1981. 200 p. (in Russian).
15. Ice navigation conditions in the seas of the Northern Hemisphere / *A.Ya. Buzuev, V.F. Dubrovtshev, V.F. Zakharov, V.I. Smirnov.* Main Department of Navigation and Oceanography, USSR Ministry of Defense, 1988. 280 p. (in Russian).
16. *Kashtelyan V.I., Poznyak I.I., Ryvlin A.Ya.* Ice resistance of ships. Leningrad : Sudostroenie, 1968. 238 p. (in Russian).
17. *Assur A.* Problems in Ice Engineering // Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Symposium on Ice Problems. [S. 1.] : IAHR, 1975. P. 361–372.

## References

1. Hazardous ice phenomena for Arctic shipping / [E.U. Mironov, S.V. Frolov, S.V. Klyachkin et al.]. St. Petersburg : Arctic and Antarctic Research Institute, 2010. 319 p. (in Russian).
2. *Li F., Kujala P., Montewka J.* A ship in compressive ice: an overview and preliminary analysis // Proceedings of 25<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC 2019). Red Hook : Curran, 2019. P. POAC19-068 (12 p.).
3. Compression of the ice cover in the Pechora Sea: a Natural phenomenon and its impact on marine operations / *I.V. Buzin, S.V. Klyachkin, S.V. Frolov* [et al.] // Arctic: Ecology & Economy. 2022. Vol. 12, No. 4. P. 500–512. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-500-512 (in Russian).
4. Strength of ice-going ships / *Yu.N. Popov, O.V. Faddeev, D.E. Kheisin, A.A. Yakovlev.* Leningrad : Sudostroenie, 1967. 224 p. (in Russian).

18. Timokhov L.A., Kheisin D.E. Sea ice dynamics. Mathematical models. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1987. 272 p. (in Russian).
19. La Prairie D., Wilhelmson V., Riska K. A transit simulation model for ships in Baltic ice conditions, documentation of the calculation routing / Helsinki University of Technology. Otaniemi, 1995. 38 p.
20. Goldstein R.V., Osipenko N.M. Cracking resistance and failure of ice sheet under icebreakers // Transactions of Arctic and Antarctic Research Institute. 1986. Vol. 391. P. 137–156 (in Russian).
21. Goldstein R.V., Osipenko N.M. Fracture mechanics and Arctic development challenges // *Arctic: Ecology & Economy*. 2015. No. 4(20). P. 14–24 (in Russian).
22. Kazakov A.T. Safe distance and selection of optimal speed for icebreaker pilotage : Autoabstract of Cand. Sci. Theses / Leningrad Higher Marine Engineers School named after Admiral S.O. Makarov. Leningrad, 1986. 24 p. (in Russian).
23. Sazonov K.E. Icebreaker pilotage of large ships in closing channels // *Morskoy Vestnik*. 2006. No. 4(20). P. 83–85 (in Russian).
24. Sazonov K.E. Navigation challenges for large-size ships in ice conditions // *Ships and Offshore Structures*. 2011. Vol. 6, No. 3. P. 231–238. DOI: 10.1080/17445302.2010.548123.
25. Bokatova E.A., Sazonov K.E. Calculation of ship speed in an ice channel under ice compression and partial interaction of ship sides with channel edges // Transactions of Krylov Central Research Institute. 2012. Vol. 66(350). P. 43–46 (in Russian).
26. Appolonov E.M., Sazonov K.E., Bokatova E.A. On probability of ship entrapment in compact ice // *World of Transport*. 2012. Vol. 10, No. 4(42). P. 4–9 (in Russian).
27. Application of results from the research project ‘A ship in compressive ice’ to ship operability / K. Riska, P. Kujala, R. Goldstein [et al.] // Proceedings of 13<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'95). St. Petersburg, 1995. Vol. 4. P. 84–99.
28. Lu L., Kujala P., Goerlandt F. A method for assessing ship operability in dynamic ice for independent navigation and escort operations // *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 225. P. 108830. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108830.
29. Shtrek A.A. Maneuverability and propulsion performance of future large Arctic ships in closing ice channels: design aspects // *Morskoy Vestnik*. 2013. No. 4(48). P. 90–93 (in Russian).
30. A ship in compressive ice. Analysis of the ice failure process : Report from the joint Finnish-Soviet research project : M-165 / P. Kujala, R. Goldstein, V. Danilenko, N. Osipenko. Otaniemi, 1993. 70 p.
31. Kujala P., Ralph S. Ship in Compressive Ice. Results of model scale tests to study pile-up process of ice : Report from the joint Finnish-Soviet research project : M-191. Otaniemi, 1994. 56 p.
32. Svistunov I.A. Determination of heeling moment exerted on *Severny Polyus* ice-resistant self-propelled platform by compact ice: model test results // *Arctic: Ecology & Economy*. 2019. No. 3(35). P. 97–106. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-97-106 (in Russian).
33. Svistunov I.A. Experimental and analytical procedure for determination of global load from ice compressions on ships and floating platforms working as polar drifting observatories // *Arctic: Ecology & Economy*. 2023. Vol. 13, No. 1. P. 85–96. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-85-96 (in Russian).
34. Macro-scale experimental studies of ice compressions in the Arctic Ocean during the first drift of *Severny Polyus* ice-resistant self-propelled platform as part of *Severny Polyus 41* drifting polar station in 2022–2023/ I.A. Svistunov, K.V. Filchuk, A.V. Baklanov [et al.] // *Arctic: Ecology & Economy*. 2024. Vol. 14, No. 2. P. 274–285. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-274-285 (in Russian).
35. Suominen M., Kujala P. Ice model tests in compressive ice // Proceedings of the 21<sup>st</sup> IAHR International Symposium on Ice. Dalian : Dalian Univ. of Technology, 2012. P. 1046–1057.
36. Modelling of ship resistance in compressive ice channels / R. Külaots, P. Kujala, von Bock und Polach R., J. Montewka // Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC 2013). [Curran : Red Hook], 2014. Vol. 2. P. 1295–1305.
37. Dobrodeev A.A. Navigation peculiarities of large ships in compact drifting ice: model studies // Current challenges in modern continuum and celestial mechanics. Materials of 12<sup>th</sup> All-Russian scientific conference with international participation. Tomsk, 2023. P. 236–241 (in Russian).
38. Sazonov K.E., Dobrodeev A.A. On determination of effective compact ice pressure as per full-scale measurement results for ship movement parameters // *Arctic & Antarctic Research*. 2025. Vol. 71, No. 1. P. 63–73. DOI: 10.30758/0555-2648-2025-71-1-63-73 (in Russian).
39. Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Sazonov K.E. Propulsion performance predictions for multi-shafters. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2019. 156 p. (in Russian).
40. Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Sazonov K.E. Ice propulsion performance diagrams for ships // *Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*. 2022. Vol. 14, No. 6. P. 805–814. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-805-814 (in Russian).

### Сведения об авторах

*Добродеев Алексей Алексеевич*, к.т.н., заместитель начальника отделения по развитию ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-69-78. E-mail: A\_Dobrodeev@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6305-5090>.

*Сазонов Кирилл Евгеньевич*, д.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; профессор кафедры океанотехники и морских технологий ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: kirsaz@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3364-1309>.

*Свистунов Иван Андреевич*, к.т.н., с.н.с. отдела ледовых качеств судов ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт». Адрес: 199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38,

лит. А. E-mail: svisti929@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0002-9436-4288>.

### About the authors

*Aleksey A. Dobrodeev*, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Division for Development, Krylov State Research Centre; Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: A\_Dobrodeev@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6305-5090>.

*Kirill E. Sazonov*, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory of Krylov State Research Centre, Professor of Ocean Engineering and Marine Technologies Department, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: kirsaz@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3364-1309>.

*Ivan A. Svistunov*, Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist, Arctic & Antarctic Research Institute (AARI). Address: 38a, Beringa st., St. Petersburg, Russia, post code 199397. E-mail: svisti929@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0002-9436-4288>.

Поступила / Received: 18.09.25

Принята в печать / Accepted: 12.11.25

© Добродеев А.А., Сазонов К.Е., Свистунов И.А., 2025