

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-406-424>
УДК 629.561.5



ОБЗОР

REVIEW

ДВИЖЕНИЕ СУДОВ В ТЕРТЫХ ЛЬДАХ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

К.Е. САЗОНОВ^{1,2}

¹ — Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия

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

kirsaz@rambler.ru

Резюме

В статье приведен обзор исследований, посвященных изучению движения судов в тертых льдах. Показано, что для определения ледового сопротивления судна в указанных условиях используются теоретические методы исследования и метод физического моделирования в ледовых бассейнах. В работе прослежена эволюция теоретических моделей, применяемых для расчета. Описаны методы физического моделирования тертого льда в ледовом бассейне, обсуждены основные трудности, возникающие при экспериментальных исследованиях. Рассмотрено активно развивающееся в настоящее время компьютерное моделирование движения судна в тертых льдах на основе методов дискретных элементов. Дано описание методов изучения работы двигателей судов в тертых льдах.

Ключевые слова: двигатель, ледовое сопротивление, ледовый бассейн, метод дискретных элементов, тертый лед.

Для цитирования: Сазонов К.Е. Движение судов в тертых льдах: результаты исследований // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 4. С. 406–424. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-406-424>.

Поступила 18.10.2021

После переработки 30.11.2021

Принята 03.12.2021

SHIP OPERATION IN BRASH ICE: RESULTS OF INVESTIGATIONS

KIRILL E. SAZONOV^{1,2}

¹ — Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² — St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

kirsaz@rambler.ru

Summary

The paper gives a review of the studies concerned with operation of vessels in brash ice. Recently, the ice conditions have received an ever increasing attention of the researchers related to the fact that shipping in the Arctic regions and freezing seas, as well as in inland waterways has been scaled up. One of the important fields of brash ice studies is specifics of sailing under these conditions and primarily determination of the ship ice resistance. The paper shows that theoretical methods combined with physical modeling in ice basins are used for determination of the ship ice resistance under brash ice conditions. The paper traces the evolution of

theoretical models utilized for calculations. It is mentioned that the models are mainly based on loose material mechanics. A rapidly developing computer modeling of ship motion in brash ice based on discrete element method is considered. Physical modeling techniques used for modeling brash ice in ice basin are described, and challenges of experimental investigations are discussed. It is pointed out that experimental studies in ice basin can provide valuable data not only about ship ice resistance but also about the mechanisms giving rise to ice channels filled with brash ice. The paper describes the methods for studying operation of ship propellers in brash ice conditions. It is concluded that further research into brash ice is needed.

Keywords: brash ice, ice basin, ice resistance, method of discrete elements, propeller.

For Citation: Sazonov K.E. Ship operation in brash ice: results of investigations *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (4): 406–424. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-406-424>.

Received 18.10.2021

Revised 30.11.2021

Accepted 03.12.2021

ВВЕДЕНИЕ

К тертому льду (ТЛ) (*brash ice*) относятся ледяные образования, характерный размер которых не превышает 2 м. ТЛ может образовываться при протекании естественных процессов в водной среде, но основной интерес представляет ТЛ, образовавшийся в результате хозяйственной деятельности человека. Наблюдающаяся в последнее время интенсификация движения судов в припайных льдах и на внутренних водных путях привела к появлению новых объектов изучения морской ледотехники — судоходных каналов и акваторий портов, заполненных ТЛ. Толщина слоя ТЛ в канале или на акватории порта может существенно превышать толщину находящегося рядом неразрушенного ледяного покрова, поэтому такой слой может являться существенной преградой для осуществления судоходства. Движение судов по каналу, заполненному ТЛ, может быть затруднено либо вообще невозможно. При осуществлении зимней навигации на Енисее в течение холодного периода приходилось прокладывать несколько параллельных каналов [1]. Изучение особенностей взаимодействия судов с ТЛ является актуальной проблемой, решению которой в последнее время вновь уделяется достаточно большое внимание [2].

С точки зрения ледовой ходкости судов, как одного из направлений развития морской ледотехники, изучение особенностей движения судов в ТЛ представляет собой расширение набора ледовых условий, для которых проводятся исследования вновь проектируемых судов. Взаимодействие корпуса судна и его движителей с тертым льдом имеет ряд существенных отличий от уже достаточно хорошо изученного движения судна в сплошных ровных и битых льдах. Тем не менее, хотя испытания моделей проектируемых судов в ТЛ стали практически обязательным элементом исследований в ледовых бассейнах, еще пока нельзя утверждать, что полученные экспериментальные данные активно используются при проектировании корпуса судна. В настоящее время результаты таких исследований служат в основном для констатации ледовых характеристик спроектированного судна в указанных ледовых условиях.

Первые работы по изучению различных аспектов взаимодействия судов с ТЛ появились в 1980-х гг. [3–6]. Их особенностью было то, что авторы помимо рассмотрения вопросов взаимодействия судов с ТЛ уделили много внимания изучению самого феномена ТЛ. Они изучали строение каналов с ТЛ, разрабатывали первые

простые математические модели, позволяющие прогнозировать нарастание тертого льда в каналах в зависимости от суммы градусо-дней мороза и частоты движения судов по каналу. Особо необходимо выделить работы П. Каннари [4] и Дж. Сандквиста [5], в которых были предложены методы исследования каналов и получены натурные данные об их строении использующиеся до сих пор.

Дальнейшие исследования были направлены на уточнение моделей прогнозирования нарастания толщины слоя ТЛ в канале [7], расчеты образования консолидированного слоя в ТЛ [8–9 и др.], изучение свойств ТЛ как сыпучей среды [10–13 и др.]. Здесь необходимо отметить, что механика сыпучей среды применяется для описания различных ледяных нагромождений (*ice rubble*). Изучению свойств таких нагромождений посвящено большое количество работ, данные, полученные в них, часто могут быть использованы и при анализе ТЛ.

Все характеристики ТЛ обладают большой изменчивостью, тем не менее при анализе особенностей движения судов в таких льдах используются некоторые средние значения. В качестве примера приводится сводка механических характеристик тертого льда, заимствованная из работы [13], которая была использована для анализа выполненных в этой работе экспериментов: пористость — 40 %, угол естественного откоса (в воде/на воздухе) — $26,6^\circ / 20,7^\circ$, угол внутреннего трения — $42\text{--}58^\circ$.

РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕРТОГО ЛЬДА ДВИЖЕНИЮ СУДНА

Определение ледового сопротивления судна осуществляется либо путем расчета по той или иной математической модели (как правило, такие модели описывают среднее значение ледового сопротивления в зависимости от ряда параметров), либо путем проведения модельного эксперимента в ледовых бассейнах. В настоящее время возник еще один подход к определению ледового сопротивления, основанный на компьютерном моделировании движения судна во льдах. В этом случае воздействие внешней среды на судно определяется расчетом по некоторому алгоритму, при этом все действующие силы обычно считаются явными функциями времени. Ниже рассматривается применение упомянутых подходов к изучению движения судна в ТЛ.

Одной из первых попыток описания ледового сопротивления, воспринимаемого судном при его движении в ТЛ, была работа М. Меллора [3]. Им предложено аналитическое выражение для определения сопротивления судна, основывающееся на законе Мора–Кулона. Он рассматривает две составляющие ледового сопротивления: первая зависит от давления ТЛ на носовую оконечность, вторая — от трения ТЛ на подводной части корпуса, расположенной после носового заострения. По его мнению, основное сопротивление в этих условиях формируется в носовой оконечности судна и сильно зависит от формы носа в плане. Расчетная формула, предложенная Меллором, может быть записана в следующем виде:

$$R_{ik} = \frac{A_k}{2} \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) (1 - p) \rho_i g \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_w} \right) h_i^2 B, \quad (1)$$

где $k = 1, 2$; $A_1 = 1,3 - 2,5$ для острых носовых оконечностей и $A_2 = 1,7 - 2,6$ для тупых; ϕ — угол внутреннего трения ТЛ; p — пористость ТЛ; ρ_i, ρ_w — плотность льда и воды; h_i — толщина слоя ТЛ; B — ширина судна.

Долгое время формула (1) оставалась единственным математическим описанием процесса взаимодействия судна с ТЛ. Следующая математическая модель

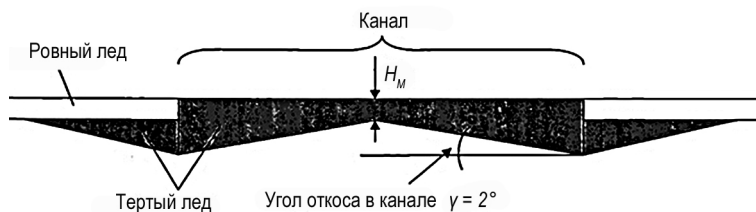


Рис. 1. Геометрическая модель канала с ТЛ

Fig. 1. Geometric model of a channel with brash ice

была предложена К. Риска и др. [7, 14, 15] в процессе разработки финско-шведских правил определения ледового класса судна (*Finnish-Swedish ice class rules*) [16]. При разработке модели авторы использовали геометрическое представление ледяного канала (рис. 1), а также соотношения теории сыпучих сред.

В результате было получено следующее выражение для расчета ледового сопротивления судна R_{ch} , движущегося в этих условиях:

$$R_{ch} = \frac{1}{2} \mu_B \Delta \rho g H_F^2 K_P \left[\frac{1}{2} + \frac{H_M}{2H_F} \right] \left[B + 2H_F \left(\cos \delta - \frac{1}{\tan \psi} \right) \right] (\mu_h \cos \phi + \sin \psi \sin \alpha) + \mu_B \Delta \rho g H_F^2 K_0 \mu_h L_{par} + \Delta \rho g \left[\frac{LT}{B^2} \right] H_M A_{WF} F n^2, \quad (2)$$

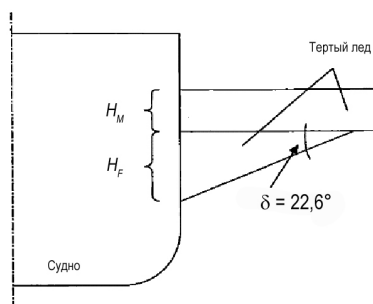
где $\mu_B = 1 - p$ — коэффициент заполнения слоя ТЛ льдом; p — пористость ТЛ; $\Delta \rho = \rho_w - \rho_i$; $K_P = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2} \right)$ — коэффициент пассивного давления ТЛ как сыпучей среды; ϕ' — угол внутреннего трения ТЛ; H_M — толщина слоя ТЛ посередине канала (рис. 1); $\delta = 22,6$ — угол естественного откоса ТЛ в воде; μ_h — коэффициент трения ТЛ об обшивку корпуса; α, ψ, ϕ — углы наклона ватерлинии, шпангоута и ба-токса; $K_0 = \mu_0 / (1 - \mu_0)$ — коэффициент бокового давления в покое, μ_0 — коэффициент ТЛ, аналогичный коэффициенту Пуассона для упругих тел [17] (величина μ_0 трудно определяемая для ТЛ, поэтому в практических расчетах можно использовать аппроксимацию Дж. Джейки $K_0 = 1 - \sin \phi'$ [18]); L_{par} — длина цилиндрической вставки; A_{WF} — площадь ватерлинии, $F n$ — число Фруда; L, B, T — длина, ширина и осадка судна. H_F задает толщину слоя ТЛ после его смещения и перемещения корпусом судна (рис. 2). Эта толщина, зависящая от значения двух углов δ и γ , вычисляется по следующей формуле, которая получена на основании геометрических построений [7]:

$$H_F = H_M + \frac{B}{2} \tan \gamma + (\tan \gamma + \tan \delta) \sqrt{\frac{B \left(H_M + \frac{B}{4} \tan \gamma \right)}{\tan \gamma + \tan \delta}}. \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) достаточно сложны и содержат целый ряд параметров, описывающих ТЛ, что неудобно для использования в финско-шведских правилах. Поэтому они были упрощены. Выражение (3) для случая $B > 10$ м и $H_M > 4$ может быть записано следующим образом:

$$H_F = 0,26 + \sqrt{B H_M} \quad (4)$$

Из формулы (2) было получено два упрощенных выражения. Первое выражение используется в случае, когда известен теоретический чертеж судна, для которого

Рис. 2. Определение H_F Fig. 2. H_F definition

необходимо определить сопротивление тертого льда. Это выражение приведено в правилах [16] и здесь не приводится из-за его громоздкости. Второе выражение используется в случае, когда о судах класса IA и IA Super имеется лишь общая информация. В этом случае ледовое сопротивление определяется следующими выражениями:

$$R_{ch} = C_1 + C_2 + 460(H_F + H_M)^2 (B + 0,658H_F) + 18,7LH_F^2 + 825\left(\frac{LT}{B^2}\right)^3 \frac{B}{4}, \quad (5)$$

где коэффициенты C_1 и C_2 берутся из табл. 1.

Эти коэффициенты учитывают наличие консолидированного слоя в ТЛ.

Таблица 1

Значения коэффициентов C_1 и C_2

Table 1

Values of coefficients C_1 and C_2

Ледовый класс судна	IA	IA Super	
		без бульба	с бульбом
C_1	0	$10,3 \frac{BL}{2TB^{-1}+1} + 1,84(45,8B + 2,94L + 5,8BL)$	$0,3 \frac{BL}{2TB^{-1}+1} + 2,89(45,8B + 2,94L + 5,8BL)$
C_2	0	$3,52(1530 + 170B) + 400(1 + 1,2TB^{-1})B^2L^{-1/2}$	$6,67(1530 + 170B) + 400(1 + 1,2TB^{-1})B^2L^{-1/2}$

Выражение (5) часто используется при выполнении расчетов [19, 20] ледового сопротивления судна, но при его использовании необходимо помнить, что численные значения коэффициентов получены лишь для одного значения скорости движения судна, которое составляет 5 узлов [16].

Постоянно продолжается работа по улучшению финско-шведских правил. Так, в работе [21] исследовалось влияние профиля канала с ТЛ на определение ледового сопротивления по правилам. В результате было выяснено, что различия в профилях канала оказывают незначительное влияние. В той же работе были установлены довольно большие различия прогнозируемых по данным испытаний в ледовом бассейне и измеренных в натурных условиях значений потребляемой судном мощности при движении по каналу. Одной из причин такого расхождения является, по мнению автора работы, несовпадение характеристик каналов в модельных и натурных условиях, а также то, что испытания в ледовых бассейнах проводятся при более низких скоростях движения. Автор также указал на существующую путаницу в определении важной характеристики H_F .

Некоторые современные исследователи считают, что особенности профиля канала могут оказывать влияние на характеристики движения судна в нем, поэтому в работе [22] предложена простая геометрическая модель формирования этого профиля в зависимости от параметров проходящего по каналу судна.

Усовершенствованию правил посвящена также работа [23]. Усовершенствования касались следующих аспектов. Авторы работы предложили вариант модифицированных формул финско-шведских правил, которые учитывают наличие более толстых слоев ТЛ в канале (более 1 м), а также наличие в нем развитого консолидированного слоя (толщиной более 0,1 м). Кроме этого, они предложили способы учета влияния утолщенного консолидированного слоя и его прочности на изгиб на ледовое сопротивление судна. По мнению авторов, предложенные ими изменения позволяют распространить применение формул финско-шведских правил на ледяные каналы, формируемые в условиях Арктики, например на Оби и Енисее. Также модифицированные формулы должны позволять проводить расчеты для современных крупнотоннажных судов. Можно указать на недостаток рассматриваемой работы. В ней не учитывается воздействие ТЛ на днище судна, что вполне вероятно при увеличении толщины слоя ТЛ. Ранее авторы в работе [8] такую возможность рассматривали.

В работах [24, 25] была предложена новая формула для расчета ледового сопротивления судна в несмерзшемся канале, заполненном ТЛ. Ледовое сопротивление рассчитывается как сумма четырех составляющих: сопротивления, связанного с перемещением корпусом судна массы тертого льда на расстояние, равное осадке судна T ; импульсного сопротивления, возникающего из-за мгновенного сообщения частицам тертого льда некоторой скорости корпусом движущегося судна; трения частиц тертого льда о носовую и кормовую оконечности судна и его днище; трения частиц тертого льда о борта судна, которое определяется с учетом образования ледяных нагромождений у борта. Ледовое сопротивление определяется по формуле:

$$\begin{aligned} R_{ch} = & \Delta\rho(1-p)gTH_M \frac{B}{2\sin\alpha_0} \left[1 + \frac{1}{\sin\alpha_0} \left(1 - \frac{2T}{B} \right) \right] + \\ & + \rho_I(1-p) \frac{B}{2\sin\alpha_0} H_M V_s^2 \left(\frac{1}{\sin\alpha_0} + \frac{1}{\sin\varphi_0} \right)^2 + \\ & + \mu_h \Delta\rho(1-p)g \left[H_M \frac{(B-2T)}{\sin\alpha_0} \left(L_{PM} + \frac{T\cos\theta}{\operatorname{tg}\varphi_0} \right) - V_{bott} \right] + \\ & + 2\mu_h \Delta\rho(1-p)gS_{PM}L_{par} \frac{\sin\delta\cos\gamma}{\cos(\delta+\gamma)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где: $\gamma = \arctg\mu_h$; $\theta = \arcsin\sqrt{1 - \frac{\cos^2\alpha_0}{\cos^2\varphi_0}}$; α_0, φ_0 — углы наклона ватерлинии к диа-

метральной плоскости на 0-м шпангоуте и форштевня; V_{bott} — объем ТЛ, скользящего с днища судна на один борт, задается следующими выражениями:

$$\begin{aligned} V_{bott} = & L_{par} \left(H_M - \frac{B-2T}{8\sin\alpha_0} \operatorname{tg}\delta \right)^2, \quad \text{при } \frac{B-2T}{8\sin\alpha_0} \operatorname{tg}\delta < H_M; \\ V_{bott} = & \frac{L_{PM}H_M^2}{2\operatorname{tg}\delta}, \quad \text{при } \frac{B-2T}{8\sin\alpha_0} \operatorname{tg}\delta \geq H_M. \end{aligned}$$

Площадь нагромождения ТЛ между бортом судна и недеформированным слоем ТЛ:

$$S_{PM} = \frac{1}{L_{PM}(1-p)} \left(\frac{2T^2 \cos \theta}{\sin \varphi_0 \sin \alpha_0} H_M + V_{bott} \right).$$

Результаты расчетов по формуле (6) были сопоставлены с данными модельного эксперимента в ледовом бассейне и показали с ними удовлетворительное совпадение.

В настоящее время все большее распространение в морской ледотехнике получают методы компьютерного моделирования процессов, происходящих при взаимодействии различных инженерных объектов со льдом. Не составляют исключения и исследования движения судов в ТЛ. Наибольшее распространение при компьютерном моделировании движения судна в ТЛ получил метод дискретных элементов (МДЭ), который эффективен для исследования достаточно быстрых процессов, связанных с переносом вещества. МДЭ первоначально применялся для описания формирования торосистого образования [26] или взаимодействия морского инженерного сооружения или судна с битым льдом [27, 28]. В настоящее время сфера применения МДЭ постоянно расширяется, что обусловлено его высокой эффективностью. Основным недостатком МДЭ считаются большие временные затраты на реализацию алгоритма.

При решении задач морской ледотехники методом дискретных элементов в настоящее время применяются два типа таких элементов [29]: гладкие (*smooth*) и негладкие (*nonsmooth*). В работе [30], посвященной анализу применения МДЭ с гладкими и негладкими элементами для изучения гранулированных материалов, указано, что различие между элементами заключается в учете вязкоупругого взаимодействия при контакте элементов, в этом случае элементы являются гладкими. При использовании негладкого элемента столкновения между ними рассматриваются как мгновенные события при учете действия сил трения. При таких взаимодействиях скорости элементов могут скачкообразно изменяться. Авторы работы пришли к выводу, что негладкие элементы больше подходят для описания твердых и плотных фрагментов среды относительно большого размера, которые движутся с относительно небольшими скоростями. Применение негладких элементов позволяет существенно снизить время счета.

В работе [29] высказано мнение, что куски льда, составляющие ледяные нагромождения и ТЛ, во многом удовлетворяют указанным требованиям, поэтому для их описания можно использовать негладкие элементы. Небольшой обзор применения гладких и негладких элементов в МДЭ содержится в работе [31].

В настоящее время имеется относительно небольшое количество публикаций по применению МДЭ для изучения движения судов в ТЛ. В ряде публикаций, например [32, 33], несмотря на указание в заглавии, что в работах рассматривается ТЛ, фактически изучается движение судна в мелкобитых льдах (к ТЛ в этих работах могут относиться только размеры кусков льда). В работах [34, 35] описано применение МДЭ к рассмотрению движения судна в канале ТЛ. В исследовании [34] предпринята попытка совместного использования методов CFD (Computational Fluid Dynamics) и МДЭ для описания характера движения масс ТЛ по корпусу судна. Автор отмечает, что комбинированный метод CFD – МДЭ открывает новые возможности для исследования взаимодействия судна и льда. Результаты выполненных расчетов достаточно хорошо согласуются с другими аналогичными исследованиями. Тем не

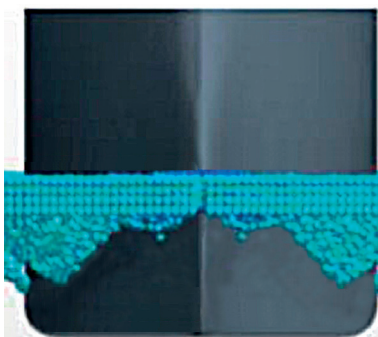


Рис. 3. Визуализация обтекания корпуса судна ТЛ в МДЭ [34]

Fig. 3. Visualization of the flow brash ice around the ship's hull in MDE [34]

менее все еще имеются существенные различия в траекториях движения блоков льда между результатами математического моделирования и экспериментом. На рис. 3 представлена одна из визуализаций результатов расчетов.

Завершая обзор расчетных методов определения сопротивления ТЛ движению судна, можно констатировать, что эти исследования в настоящее время активно развиваются как в направлении создания аналитических моделей, так и в направлении разработки компьютерных моделей. Анализ приведенных аналитических расчетных выражений показывает, что их эволюция происходит в сторону усложнения, вызванного желанием исследователей с большей детализацией описать процесс взаимодействия корпуса судна с ТЛ. На развитие методов математического моделирования движения судна в ТЛ наибольшее влияние в настоящее время оказывает проблема выбора подходящего метода описания ТЛ как специфической природной среды. Наибольшее количество исследователей склоняется к применению МДЭ, однако на этом пути имеются еще определенные трудности. По-видимому, в ближайшем будущем работы по построению различных математических моделей движения судна в ТЛ будут продолжены.

ИЗУЧЕНИЕ ЛЕДОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕРТОГО ЛЬДА В ЛЕДОВЫХ БАССЕЙНАХ

Исследования в ледовых бассейнах особенностей взаимодействия судов с ТЛ начались на самых ранних стадиях его изучения [6] и продолжают до настоящего времени [21, 25, 36–39]. Основной целью таких испытаний обычно является исследование закономерностей формирования ледового сопротивления судов в каналах с ТЛ [21, 25] или определение мощности энергетической установки, необходимой для движения в ТЛ [38, 39]. Здесь необходимо отметить большую роль в развитии модельных исследований Морской Администрации Финляндии.

Подавляющее большинство испытаний моделей судов в ТЛ проводятся в рамках выполнения исследований в обеспечение их проектирования. Это обстоятельство накладывает ряд существенных ограничений на подобные испытания, что весьма затрудняет изучение закономерностей ледового сопротивления в ТЛ. Обычно ледовые испытания в ТЛ проводятся в том же поле модельного льда, что и испытания по определению сопротивления ровного льда. Поэтому толщина ледяного покрова, из которого готовится ТЛ, оказывается заданной и обычно превышает толщину блоков ТЛ, из которых складывается канал. Кроме этого, увеличение толщины льда при-

водит к смещению среднего размера обломков в сторону возрастания их размеров. В работе [13] указывается, что в ледовом бассейне при использовании ручного инструмента для приготовления ТЛ (рис. 4) практически невозможно получить куски, характерный размер которых меньше толщины льда. Все это приводит к трудностям при сопоставлении модельных и натуральных данных [21]. Иногда в ледовых бассейнах применяется засыпка заранее приготовленных кусков льда заданного размера в канал, проложенный в поле моделированного льда [40]. В этой же работе указывается, что для достижения правдоподобных результатов при испытаниях модели необходимо создание как минимум двух слоев льда.

Иллюстрацией к вышесказанному являются результаты, приведенные в работе [37], в которой данные натуральных измерений сопоставлялись с данными модельного эксперимента. Модельный эксперимент проводился в трех типах каналов, один из которых был заполнен кубиками льда (по-видимому, пресного), два других были приготовлены из гранулированного льда, различающегося прочностью. Результаты сравнения показали, что модельные данные существенно превышают натурные измерения. При этом результаты, полученные с кубиками льда, оказались наиболее близкими к натуре. Автор работы предполагает, что это в какой-то мере связано с тем, что они были наиболее прочными и практически не разрушались, в отличие от льдинок из гранулированного льда. На основании этого можно предположить, что энергия, затрачиваемая на дробление обломков, вносит заметный вклад в формирование ледового сопротивления судна. К сожалению, в работе не указаны размеры обломков льда, поэтому выяснить, повлиял ли этот фактор на полученные результаты, не представляется возможным. Автор исследования отмечает, что полученные результаты относятся только к одному судну и исследование необходимо было бы повторить для других типов судов.

В работе [36] предпринята попытка моделирования процесса формирования ТЛ льда в канале при последовательных проходах модели судна. Принципиально такой подход может позволить наиболее точно смоделировать ТЛ в канале. Однако при проведении таких экспериментов необходимо учитывать критерии моделирования, связанные с протеканием теплофизических процессов нарастания консолидированного слоя в ТЛ. В указанной работе эти критерии не рассматривались, что несколько снижает ценность полученных результатов. Аналогичные попытки предпринимались ранее в российских ледовых бассейнах [41].

Из вышеизложенного следует, что одной из проблем, важных для качественного проведения модельных исследований в ледовых бассейнах, является разработка технологии приготовления моделированного ТЛ, распределение по размерам которого в наибольшей степени соответствовало бы натурному. В работе [42] дополнительно высказывается мнение о том, что в ледовых бассейнах необходимо моделировать не только размеры, но и форму кусков льда. Одним из возможных способов решения указанной проблемы может служить механическая установка для приготовления ТЛ, разработанная в ледовом бассейне Крыловского центра [43]. Это устройство представляет собой установленную на буксировочной тележке конструкцию, включающую в себя вал, вращаемый электромотором с установленными на нем вращающимися Г-образными ножами. Ножи выполнены в виде отдельных модулей, насаживаемых на вал, что позволяет создавать в ледяном покрове канал требуемой ширины. Варьируя скорость движения буксировочной тележки и частоты



Рис. 4. Процесс приготовления ТЛ в ледовом бассейне [38]

Fig. 4. Process of preparation of brash ice in an ice basin [38]

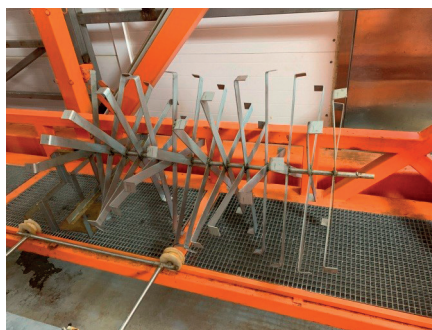


Рис. 5. Внешний вид установки для приготовления ТЛ

Fig. 5. Exterior view of the device for the preparation of brash ice

вращения вала, можно добиться создания требуемого размера кусков ТЛ. Внешний вид установки показан на рис. 5.

Выше уже отмечалось, что испытания моделей проектируемых судов в ТЛ постепенно становятся обязательным элементом работы ледовых бассейнов. Имеется информация, что Ледовым комитетом Международной конференции опытовых бассейнов (ИТТС) предпринимаются попытки разработки рекомендаций по проведению таких модельных испытаний с целью их стандартизации. Одной из основных задач в этом направлении является разработка требований к размеру кусков льда, имитирующих в ледовом бассейне ТЛ, а также создание технологий их получения. Еще одной задачей, которую необходимо решить в ближайшее время, является исследование вопроса о применимости традиционных критериев моделирования для условий ТЛ [44].

ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ С ТЕРТЫМ ЛЬДОМ

Большинство исследований особенностей взаимодействия движителей судов с ТЛ носит экспериментальный характер и выполнено в ледовых бассейнах. Первые исследования были выполнены финскими специалистами [45, 46]. Для таких испытаний часто используется установка испытаний моделей гребных винтов в «свободной воде» [47].

В работе [45] описываются результаты экспериментов, в которых слой льда имитировался пластиковыми пластинками. Испытания проводились с четырьмя моделями гребных винтов, которые отличались дисковым и шаговым отношениями. Основным результатом, полученный в работе, заключается в том, что при наличии имитаторов льда в широком диапазоне изменения поступи коэффициент момента гребных винтов значительно возрос, коэффициент упора в среднем не изменился, хотя наблюдалось его небольшое снижение при малой поступи.

В работе [46] описаны исследования, проводимые в ледовом бассейне с моделированным столбчатым льдом. Для проведения исследований в бассейне был создан равномерно восторщенный слой льда. Необходимо отметить, что размеры обломков льда в этом слое могли существенно превышать размеры льдин, характерные для ТЛ. Испытывались также 4 модели гребных винтов с различными значениями дискового и шагового отношений. В качественном отношении полученные результаты совпадают с данными работы [45].

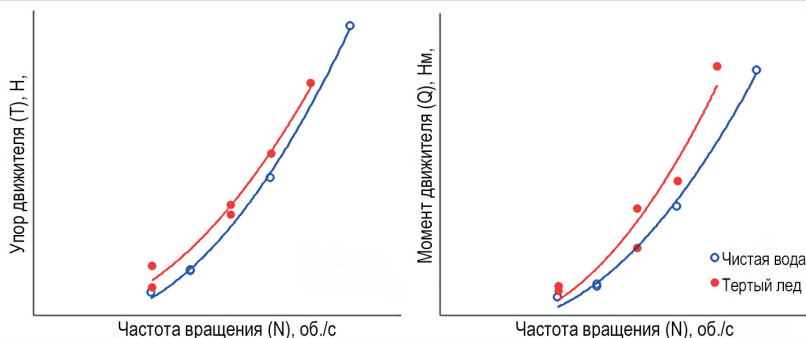


Рис. 6. Типичные зависимости упора и момента движителя за корпусом модели, движущейся в ТЛ [44]

Fig. 6. Typical dependences of the thrust and the moment of the propeller behind the body of the model moving in the brash ice [44]

Исследованию возможности использования в условиях ТЛ малых судов Береговой обороны США, которые не способны сами разрушать лед, посвящена работа [48]. Основной ее целью было исследование работоспособности традиционных для малых судов движительных комплексов в условиях возможного попадания к ним ТЛ. В результате авторы рекомендовали относительно безопасные скорости движения (не более 5 узлов), при которых вероятность поломки движителей мала.

В настоящее время специальные исследования взаимодействия движителей с ТЛ не проводятся. В результате проведения в ледовых бассейнах испытаний с моделями, оборудованными работающими движителями, получают информацию о характере взаимодействия гребного винта с ТЛ [29, 44]. На рис. 6 показаны типичные зависимости упора и момента движителя при самоходных испытаниях модели в ТЛ.

Теоретическому изучению работы гребного винта в ТЛ посвящена всего одна работа [49]. В этой работе на основании традиционных подходов, разработанных в теории движителей, предпринята попытка рассчитать «гидродинамические» характеристики гребного винта, взаимодействующего с ТЛ. Основной идеей этой работы является описание внешней среды (ТЛ) как очень вязкой жидкости. Авторы работы использовали теоретическое решение, приведенное в известном курсе Л.Д. Ландау и М.Е. Лифшица, а также исследования Де Каролиса и др. [50], которые изучали эффективную вязкость начальных форм плавающего льда в гравитационных волнах. В результате в работе выполнено численное моделирование характеристик гребного винта В4 Вагенингенской серии [51] (дисковое и шаговое отношения равны 0,7) при трех значениях кинематической вязкости ν , $2,5\nu$ и 1000ν , где ν — кинематическая вязкость воды. Результаты расчетов показали, что увеличение вязкости в 2,5 раза не оказывает заметного влияния на характеристики гребного винта. При значении вязкости 1000ν и толщине слоя ТЛ, равного 0,2 его диаметра винта, авторы получили, что коэффициент момента винта возрастает на 15–30 %, а коэффициент упора уменьшается на 10–15 %. Данные расчета были сопоставлены с результатами эксперимента, приведенного в работе [40], и показали хорошее совпадение. С точки зрения автора обзора, основным недостатком рассматриваемой работы является использованное описание ТЛ как вязкой жидкости. Континуальное описание в случае взаимодействия элемента лопасти с ТЛ не подходит. Характерный размер ТЛ (примерно 0,3 м, максимальный

1 м) сопоставим с длиной хорды профиля лопасти. По-видимому, для описания воздействия ТЛ на профиль необходимо использовать другие подходы.

К сожалению, необходимо констатировать, что объем выполненных экспериментальных и теоретических исследований особенностей работы движителей судов в ТЛ явно недостаточен для дальнейшего развития исследований ходкости судов в ТЛ. В этом важном направлении необходимо продолжать исследования, в первую очередь экспериментальные, т. к. новые опытные данные позволят создать адекватные математические модели происходящих процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен обзор исследований, посвященных изучению движения судов в ТЛ. Эта проблематика в настоящий момент является актуальной в связи с постоянно развивающимся объемом морских перевозок в ледовых условиях. Наиболее остро этот вопрос стоит при рассмотрении движения судов по каналам, проложенным в неподвижных или малоподвижных льдах, а также на акваториях портов. Массы ТЛ, образующиеся при интенсивном движении судов, могут стать непреодолимым препятствием для судоходства.

Результаты обзора показывают, что основное внимание исследователей уделяется изучению закономерностей формирования ледового сопротивления судна, движущегося в ТЛ. При этом преследуется цель разработки точных методов прогнозирования мощности энергетической установки, необходимой для поддержания заданной скорости движения в этих условиях. Кроме этого, знание законов воздействия ТЛ на корпус судна позволяет проводить оптимизацию формы корпуса, направленную на снижение ледового сопротивления. В последнее время стал повышаться интерес к оптимизации работы движителей в различных ледовых условиях, что связано с необходимостью минимизации вредных выбросов в атмосферу [52].

Изучение взаимодействия судна и ТЛ еще далеко от своего завершения. Можно с уверенностью прогнозировать, что работы в этом направлении будут продолжены. По мнению автора, в ближайшее время возникнет практическая задача создания судов, главным назначением которых будет эффективная работа в условиях ТЛ. К таким судам в первую очередь будут относиться суда технического флота, предназначенные для работы в портах, а также суда, эксплуатирующиеся на внутренних водных путях и осуществляющие прибрежное плавание. Возможно, создание таких судов потребует разработки новых форм обводов корпуса и новых решений в области их движительного комплекса.

Другим важным направлением исследований является дальнейшее физико-географическое изучение ледяных каналов, заполненных льдом, включая изучение физико-механических свойств ТЛ. Такие исследования крайне важны для изучения ледовой ходкости, т. к. дают исходную информацию для построения математических моделей. В вопросе изучения свойств ледяных каналов, заполненных ТЛ, возможна кооперация специалистов по изучению ледяных образований с ледовыми бассейнами. Первые интересные результаты таких совместных исследований изложены в работах [36, 53].

Конфликт интересов. Автор не имеет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено по Проекту SIMREC “Simulator for Improving Cross-border Oil Spill Response in Extreme Conditions”. Проект софинансируется Европейским Союзом, Российской Федерацией и Республикой Финляндия.

Competing interests. The author have no competing interests.

Financing. Study was implemented within project SIMREC “Simulator for Improving Cross-border Oil Spill Response in Extreme Conditions”. Project are co-funded by the European Union, the Russian Federation and the Republic of Finland.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность плавания во льдах / А.П. Смирнов, Б.С. Майнагашев, В.А. Голохвастов, Б.М. Соколов. М.: Транспорт, 1993. 335 с.
2. Сазонов К.Е. Развитие ледовой ходкости судов в XXI веке // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 2 (384). С. 9–28. doi: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-9-28.
3. Mellor M. Ship resistance in thick brash ice // Cold Reg. Sci. Technol. 1980. V. 3 (4). P. 305–321.
4. Kannari P. Measurements of characteristics and propulsion performance of a ship in old ice-clogged channels // Proc. of the 7 International Conference on Port and Ocean Engineering in Arctic Conditions, POAC-83, Espoo, Finland. 1983. V. II. P. 600–619.
5. Sandkvist J. Brash ice behaviour in frequented ship channels. WREL report series A. University of Luleå. 1986. V. 139. 132 p.
6. Ettema R., Huang H.-P. Ice Formation in Frequently Transited Navigation Channels. CRREL Special Report 90-40. 1990. 120 p.
7. Riska K., Wilhelmson M., Englund K., Leiviska T. Performance of Merchant Vessels in the Baltic. Winter Navigation Research Board, Res. Rpt. 1997. V. 52. 72 p.
8. Karulin E.B., Karulina M.M., Tarovik O.V. Analytical Investigation of Navigation Channel Evolution in Severe Ice Conditions // Proceedings of Ocean and Polar Engineering Conference ISOPE-2018, Sapporo, Japan. URL: https://www.researchgate.net/publication/326190461_Analytical_Investigation_of_Navigation_Channel_Evolution_in_Severe_Ice_Conditions (дата обращения 05.12.2021).
9. Riska K., Bridges R., Shumovskiy S., Thomas C., Coche E., Bonath V., Tobie A., Chomatas K., Caloba Duarte de Oliveira R. Brash ice growth model — development and validation // Cold Regions Science and Technology. 2019. V. 157. P. 30–41. doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.09.004.
10. Ettema R., Urroz-Aguirre E. Friction and cohesion in ice rubble reviewed // Cold Regions Engineering. 1991. V. 12. P. 317–326.
11. Bonath V., Zhaka V., Sand B. Field measurements on the behavior of brash ice // Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2019, Delft, The Netherlands. URL: https://www.researchgate.net/publication/41321807_Field_measurements_on_the_behavior_of_brash_ice (дата обращения 05.12.2021).
12. Matala R., Skogström T. Soil mechanics measurement methods applied in model brash ice // Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2019, Delft, The Netherlands. URL: https://www.researchgate.net/publication/353637533_The_effect_of_ice_fragment_shape_on_model-scale_brash_ice_material_properties_for_ship_model_testing (дата обращения 05.12.2021).
13. Matala R. Investigation of model-scale brash ice properties // Ocean Engineering. 2021. V. 225. doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108539
14. Riska K. The background of the powering requirements in the Finnish — Swedish ice class rules // Maritime Research Seminar '99, VVT Symposium 199, Espoo, Finland. 2000. P. 91–106.
15. Juva M., Riska K. On the power requirement in the finnish-swedish ice class rules. Winter Navigation Research Board, Res. Rpt. 2002. V. 53. 81 p.
16. Ice Class Regulations and the Application Thereof TRAFICOM/68863/03.04.01.00/2021. URL: <https://www.traficom.fi/en/transport/maritime/ice-classes-ships> (дата обращения 05.12.2021).

17. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 280 с.
18. Lee J., Kim G., Kim I., Kim D., Byun B. Effect of inter-particle strength on K0 correlation for granular materials // Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation, ISC 2016 Australian Geomechanics Society, Sydney, Australia. Australian Geomechanics Society. 2016. P. 1003–1008.
19. Сазонов К.Е. Морская ледотехника. СПб.: СПбГМТУ, 2019. 311 с.
20. Таровик О.В. Модели для прогнозирования параметров рейсов судов в Арктике: существующие подходы и возможные пути развития // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. С. 422–435.
21. Ritvanen H. Analysis of the influence of the channel profile validating the power requirement in the finnish-swedish ice class rules. Winter Navigation Research Board, Res. Rpt. 2014. V. 66. 25 p.
22. Bridges R. Geometric Model on the Evolution of Brash Ice Channels // Proceedings of the Thirtieth International Ocean and Polar Engineering Conference Shanghai, China, October 11–16, 2020. P. 617–621. URL: https://www.researchgate.net/publication/344774965_Hydrodynamic_analysis_of_a_floating_hybrid_renewable_energy_system (дата обращения 05.12.2021).
23. Karulina M.M., Karulin E.B., Tarovik O.V. Extension of FSICR method for calculation of ship resistance in brash ice channel // Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2019, Delft, The Netherlands. URL: https://www.researchgate.net/publication/333967969_Extension_of_FSICR_method_for_calculation_of_ship_resistance_in_brash_ice_channel (дата обращения 05.12.2021).
24. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Ice resistance calculation method for a ship sailing via brash ice channel // Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2019, Delft, The Netherlands. URL: https://www.researchgate.net/publication/335263770_Ice_resistance_of_ships_in_brash_ice_channel_calculation_method (дата обращения 05.12.2021).
25. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Метод расчета ледового сопротивления судна при движении в канале тертого льда // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. № 3 (389). С. 11–21. doi: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-11-21.
26. Hopkins M.A. Four stages of pressure ridging // J. Geophys. Res. 1998. V. 103 (C10). P. 21883–21891.
27. Hansen E., Loset S. Modeling floating offshore units moored in broken ice: model description // Cold Regions Science and Technology. 1999. V. 29. P. 97–106.
28. Lau M., Lawrence K.P., Rothenburg L. Discrete element analysis of ice loads on ships and structures // Ships and Offshore Structures. 2011. V. 6 (3). P. 211–221.
29. Van den Berg M., Lubbad R. The application of a non-smooth discrete element method in ice rubble modelling // Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14–18, 2015 Trondheim, Norway. URL: https://www.researchgate.net/publication/283095075_The_application_of_a_non-smooth_discrete_element_method_in_ice_rubble_modelling (дата обращения 05.12.2021).
30. Servin M., Wang D., Lacoursière C., Bodin K. Examining the smooth and nonsmooth discrete element approaches to granular matter // Int. J. Numer. Methods Eng. 2014. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nme.4612> (дата обращения 05.12.2021).
31. Metrikin I., Løset S. Nonsmooth 3D discrete element simulation of a drillship in discontinuous ice // Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2013. Espoo, Finland. URL: https://www.researchgate.net/publication/256842759_Nonsmooth_3D_Discrete_Element_Simulation_of_a_Drillship_in_Discontinuous_Ice (дата обращения 05.12.2021).
32. Konno A., Nakane A., Kanamori S. Validation of numerical estimation of brash ice channel resistance with model test // 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_143.pdf (дата обращения 05.12.2021).

33. Guo C.Y., Zhang Z.T., Tian T. P., Li X.Y., Zhao D.G. Numerical Simulation on the Resistance Performance of Ice-Going Container Ship Under Brash Ice Conditions // China Ocean Eng. 2018. V. 32. № 5. P. 546–556. doi: <https://doi.org/10.1007/s13344-018-0057-2>.

34. Koivurova J. Simulation of Ship-Ice Interaction in a Brash Ice Channel. M. Sc. Thesis. Aalto University, 2020. URL: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/42697> (дата обращения 05.12.2021).

35. Luo W., Jiang D., Wu T., Guo C., Wang Ch., Deng R., Dai S. Numerical simulation of an ice-strengthened bulk carrier in brash ice channel. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Numerical-simulation-of-an-ice-strengthened-bulk-in-Luo-Jiang/e70263687be90c853fd28207b069bd3d712cab2> (дата обращения 05.12.2021).

36. Bridges R., Riska K., Suominen M., Haase A. Experimental Tests on Brash Ice Channel Development // Proceedings of the Thirtieth International Ocean and Polar Engineering Conference Shanghai, China, October 11–16. 2020. P. 639–643.

37. Matala R. Channel resistance in full scale and in model scale. Winter Navigation Research Board, Res. Rpt. 2020. V. 107. 20 p.

38. Jeong S.-Y., Jang J., Kang K.-J., Kim H.-S. Implementation of ship performance test in brash ice channel // Ocean Engineering. 2017. V. 140. P. 57–65.

39. Matsuzawa T., Shimoda H., Wako D., Uto S., He Q., Watanabe S. Load-Varying Methods for Ship Power Estimation in Brash Ice Channel by Ice Tank Model Test // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11–16, 2017, Busan, Korea. URL: https://www.poac.com/Papers/2017/pdf/POAC17_124_Takatashi.pdf (дата обращения 05.12.2021).

40. Wang J., Lau M., Lee C. J., Cho S.-R. Modeling of Brash Ice Channel and Tests with Model CCGS Terry Fox // International Journal of Offshore and Polar Engineering. 2009. V. 19. P. 206–213.

41. Krupina N., Chernov A., Likhomanov V., Maksimova P., Savitskaya A. The ice tank study of ice performance of a large LNGC in the old channel // 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/Proceedings/2021/POAC21-032.pdf> (дата обращения 05.12.2021).

42. Matala R., Gong H. The effect of ice fragment shape on model-scale brash ice material properties for ship model testing // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14–18, 2021, Moscow, Russia. URL: https://www.researchgate.net/publication/353637533_The_effect_of_ice_fragment_shape_on_model-scale_brash_ice_material_properties_for_ship_model_testing (дата обращения 05.12.2021).

43. Сазонов К.Е., Добродеев А.А., Чепраков Н.В., Нечаев Д.А., Кильдеев Р.И. Устройство для образования канала моделируемого ледяного покрова в ледовом опытовом бассейне. Патент на изобретение 2737841 C1, 03.12.2020. Заявка № 2020111377 от 17.03.2020.

44. Von Bock und Polach R., Molyneux D. Model ice: a review of its capacity and identification of knowledge gaps // Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2017 June 25–30, 2017, Trondheim, Norway. URL: https://www.researchgate.net/publication/318093280_Model_Ice_A_Review_of_its_Capacity_and_Identification_of_Knowledge_Gaps (дата обращения 05.12.2021).

45. Kostilainen V. Performance of marine propellers in ice-clogged channels. Winter Navigation Research Board, Res. Rpt. 1981. V. 33. 26 p.

46. Juurmaa K., Segercrantz H. On Propulsion and its Efficiency in Ice // Sixth Ship Technology and Research (STAR) Symposium, Proceedings SNAME, Ottawa, 1981. P. 229–237.

47. Борусевич В.О., Русецкий А.А., Сазонов К.Е., Соловьев И.А. Современные гидродинамические лаборатории. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2019. 316 с.

48. Haskins K.L., Courville Z.R., Sodhi D.S., Stanley J.M., Zabilansky L.J., Story J.M. Interaction between Brash Ice and Boat Propulsion Systems. Cold Regions Research and Engineering Laboratory US Army Engineer Research and Development Center, ERDC TR-14-1. 2014. 85 p.
49. Karulina M.M., Karulin E.B. Analytical investigation of propeller operation in brash ice // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14–18, 2021, Moscow, Russia. URL: <https://www.poac.com/Proceedings/2021/POAC21-032.pdf> (дата обращения 05.12.2021).
50. De Carolis G., Olla P., Pignagnoli L. Effective viscosity of grease ice in linearized gravity waves // J. Fluid Mechanics. 2005. V. 535. P. 369–381.
51. Справочник по теории корабля. Т. 1. Гидродинамика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. Л.: Судостроение, 1985. 768 с.
52. Eronen H., Riska K. Possibilities to decrease the attained EEDI of the finnish merchant ships. Winter Navigation Research Board, Res. Rpt. 2014. V. 78. 26 p.
53. Bridges R., Riska K., Haase A. Experimental Tests on the Consolidation of Broken and Brash Ice // Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2019, Delft, The Netherlands. URL: https://www.researchgate.net/publication/337007935_Experimental_Tests_on_the_Consolidation_of_Broken_and_Brash_Ice (дата обращения 05.12.2021).

REFERENCES

1. Bezopasnost' plavaniia vo l'dakh. Ice navigation safety. Ed. Smirnov A.P., Mainagashev B.S., Golokhvastov V.A., Sokolov B.M. Moscow: Transport, 1993: 335 p. [In Russian].
2. Sazonov K.E. The development of ice-going ships in the XXI century. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. Proceedings of the Krylov State Scientific Center, 2018, 2 (384): 9–28. [In Russian]. doi: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-9-28.
3. Mellor M. Ship resistance in thick brash ice. Cold Reg. Sci. Technol. 1980, 3 (4): 305–321.
4. Kannari P. Measurements of characteristics and propulsion performance of a ship in old ice-clogged channels. Proc. of the 7 International Conference on Port and Ocean Engineering in Arctic Conditions, POAC-83, Espoo, Finland, 1983, II: 600–619.
5. Sandkvist J. Brash ice behaviour in frequented ship channels. WREL report series A, University of Luleå, 1986, 139: 132 p.
6. Ettema R., Huang H.P. Ice Formation in Frequently Transited Navigation Channels. CRREL Special Report 90-40. 1990: 120 p.
7. Riska K., Wilhelmson M., Englund K., Leiviska T. Performance of Merchant Vessels in the Baltic. Winter Navigation Research Board, Res. Rpt. 1997, 52: 72 p.
8. Karulin E.B., Karulina M.M., Tarovik O.V. Analytical Investigation of Navigation Channel Evolution in Severe Ice Conditions. Proceedings of Ocean and Polar Engineering Conference ISOPE-2018, Sapporo, Japan. Available at: https://www.researchgate.net/publication/326190461_Analytical_Investigation_of_Navigation_Channel_Evolution_in_Severe_Ice_Conditions (accessed 05.12.2021).
9. Riska K., Bridges R., Shumovskiy S., Thomas C., Coche E., Bonath V., Tobie A., Chomatas K., Caloba Duarte de Oliveira R. Brash ice growth model — development and validation. Cold Regions Science and Technology. 2019, 157: 30–41 doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.09.004.
10. Ettema R., Urroz-Aguirre G.E. Friction and cohesion in ice rubble reviewed. Cold Regions Engineering. 1991, 12: 317–326.
11. Bonath V., Zhaka V., Sand B. Field measurements on the behavior of brash ice. Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13,

- 2019, Delft, The Netherlands. Available at: https://www.researchgate.net/publication/41321807_Field_measurements_on_the_behavior_of_brash_ice (accessed 05.12.2021).
12. *Matala R., Skogström T.* Soil mechanics measurement methods applied in model brash ice. Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2019, Delft, The Netherlands. Available at: https://www.researchgate.net/publication/353637533_The_effect_of_ice_fragment_shape_on_model-scale_brash_ice_material_properties_for_ship_model_testing (accessed 05.12.2021).
13. *Matala R.* Investigation of model-scale brash ice properties. Ocean Engineering. 2021, 225. doi: [org/10.1016/j.oceaneng.2020.108539](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108539).
14. *Riska K.* The background of the powering requirements in the Finnish — Swedish ice class rules. Maritime Research Seminar '99, VVT Symposium 199, Espoo, Finland. 2000: 91–106.
15. *Juva M., Riska K.* On the power requirement in the finnish-swedish ice class rules. Winter Navigation Research Board, Res. Rpt. 2002, 53: 81 p.
16. Ice Class Regulations and the Application Thereof TRAFICOM/68863/03.04.01.00/2021. Available at: <https://www.traficom.fi/en/transport/maritime/ice-classes-ships> (accessed 05.12.2021).
17. *Tsytoovich N.A. Mekhanika gruntov.* Soil mechanics. Moscow.: Vysshaya shkola, 1973: 280 p. [In Russian].
18. *Lee J., Kim G., Kim I., Kim D., Byun B.* Effect of inter-particle strength on K0 correlation for granular materials. Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation, ISC 2016 Australian Geomechanics Society, Sydney, Australia. 2016: 1003–1008.
19. *Sazonov K.E. Morskaia ledotekhnika.* Marine ice engineering. St. Petersburg: SPbGMTU, 2019: 311 p. [In Russian].
20. *Tarovik O.V.* Models to predict the parameters of ship voyages in the Arctic: existing approaches and possible ways of development. Arktika: ekologiya i ekonomika. Arctic: Ecology and Economy. 2021, 11 (3): 422–435. [In Russian]. doi: [10.25283/2223-4594-2021-3-422-435](https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-422-435).
21. *Ritvanen H.* Analysis of the influence of the channel profile validating the power requirement in the finnish-swedish ice class rules. Winter Navigation Research Board, Res. Rpt. 2014, 66: 25 p.
22. *Bridges R.* Geometric Model on the Evolution of Brash Ice Channels. Proceedings of the Thirtieth International Ocean and Polar Engineering Conference Shanghai, China, October 11–16, 2020: 617–621. Available at: https://www.researchgate.net/publication/344774965_Hydrodynamic_analysis_of_a_floating_hybrid_renewable_energy_system (accessed 05.12.2021).
23. *Karulina M.M., Karulin E.B., Tarovik O.V.* Extension of FSICR method for calculation of ship resistance in brash ice channel. Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2019, Delft, The Netherlands. Available at: https://www.researchgate.net/publication/333967969_Extension_of_FSICR_method_for_calculation_of_ship_resistance_in_brash_ice_channel (accessed 05.12.2021).
24. *Dobrodeev A.A., Sazonov K.E.* Ice resistance calculation method for a ship sailing via brash ice channel. Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2019, Delft, The Netherlands. Available at: https://www.researchgate.net/publication/335263770_Ice_resistance_of_ships_in_brash_ice_channel_calculation_method (accessed 05.12.2021).
25. *Dobrodeev A., Sazonov K.* Ice resistance of ships in brash ice channel: calculation method. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019, 3 (389): 11–21. [In Russian]. doi: [10.24937/2542-2324-2019-3-389-11-21](https://doi.org/10.24937/2542-2324-2019-3-389-11-21).
26. *Hopkins M.A.* Four stages of pressure ridging. J. Geophys. Res. 1998, 103(C10): 21883–21891.
27. *Hansen E., Loset S.* Modeling floating offshore units moored in broken ice: model description. Cold Regions Science and Technology. 1999, 29: 97–106.

28. *Lau M., Lawrence K.P., Rothenburg L.* Discrete element analysis of ice loads on ships and structures. *Ships and Offshore Structures*. 2011, 6 (3): 211–221.
29. *Van den Berg M., Lubbad R.* The application of a non-smooth discrete element method in ice rubble modelling. Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14–18, 2015 Trondheim, Norway. Available at: https://www.researchgate.net/publication/283095075_The_application_of_a_non-smooth_discrete_element_method_in_ice_rubble_modelling (accessed 05.12.2021).
30. *Servin M., Wang D., Lacoursière C., Bodin K.* Examining the smooth and nonsmooth discrete element approaches to granular matter. *Int. J. Numer. Methods Eng.* Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nme.4612> (accessed 05.12.2021).
31. *Metrikina I., Løset S.* Nonsmooth 3D discrete element simulation of a drillship in discontinuous ice. Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2013. Espoo, Finland. Available at: https://www.researchgate.net/publication/256842759_Nonsmooth_3D_Discrete_Element_Simulation_of_a_Drillship_in_Discontinuous_Ice <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nme.4612> (accessed 05.12.2021).
32. *Konno A., Nakane A., Kanamori S.* Validation of numerical estimation of brash ice channel resistance with model test. Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2013. Espoo, Finland. Available at: https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_143.pdf (accessed 05.12.2021).
33. *Guo C.Y., Zhang Z.T., Tian T.P., Li X.Y., Zhao D.G.* Numerical Simulation on the Resistance Performance of Ice-Going Container Ship Under Brash Ice Conditions. *China Ocean Eng.* 2018, 32 (5): 546–556. doi: <https://doi.org/10.1007/s13344-018-0057-2>.
34. *Koivurova J.* Simulation of Ship-Ice Interaction in a Brash Ice Channel. M. Sc. Thesis. Aalto University. Available at: <https://aaltoodoc.aalto.fi/handle/123456789/42697> (accessed 05.12.2021).
35. *Luo W., Jiang D., Wu T., Guo C., Wang Ch., Deng R., Dai S.* Numerical simulation of an ice-strengthened bulk carrier in brash ice channel. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Numerical-simulation-of-an-ice-strengthened-bulk-in-Luo-Jiang/e70263687be90c853fd28207b069bd3d712cab2> (accessed 05.12.2021).
36. *Bridges R., Riska K., Suominen M., Haase A.* Experimental Tests on Brash Ice Channel Development. Proceedings of the Thirtieth. International Ocean and Polar Engineering Conference Shanghai, China, October 11–16. 2020: 639–643.
37. *Matala R.* Channel resistance in full scale and in model scale. Winter Navigation Research Board, Res. Rpt. 2020, 107: 20 p.
38. *Jeong S.-Y., Jang J., Kang K.-J., Kim H.-S.* Implementation of ship performance test in brash ice channel. *Ocean Engineering*. 2017, 140: 57–65. dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.05.008.
39. *Matsuzawa T., Shimoda H., Wako D., Uto S., He Q., Watanabe S.* Load-Varying Methods for Ship Power Estimation in Brash Ice Channel by Ice Tank Model Test. Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 11–16, 2017, Busan, Korea. Available at: https://www.poac.com/Papers/2017/pdf/POAC17_124_Takatoshi.pdf (accessed 05.12.2021).
40. *Wang J., Lau M., Lee C.J., Cho S.-R.* Modeling of Brash Ice Channel and Tests with Model CCGS Terry Fox. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 2009, 19: 206–213.
41. *Krupina N., Chernov A., Likhomanov V., Maksimova P., Savitskaya A.* The ice tank study of ice performance of a large LNGC in the old channel. Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2013. Espoo, Finland. Available at: <https://www.poac.com/Proceedings/2021/POAC21-032.pdf> (accessed 05.12.2021).
42. *Matala R., Gong H.* The effect of ice fragment shape on model-scale brash ice material properties for ship model testing. Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering

under Arctic Conditions June 14–18, 2021, Moscow, Russia. Available at: https://www.researchgate.net/publication/353637533_The_effect_of_ice_fragment_shape_on_model-scale_brash_ice_material_properties_for_ship_model_testing <https://www.poac.com/Proceedings/2021/POAC21-032.pdf> (accessed 05.12.2021).

43. Sazonov K.E., Dobrodeev A.A., Cheprakov N.V., Nechaev D.A., Kildeev R.I. *Ustroistvo dlia obrazovaniia kanala modeliruemogo ledianogo pokrova v ledovom opytovom basseine*. A device for forming a channel of a simulated ice cover in an ice experimental basin. Patent for invention 2737841 C1, 03.12. Application No. 2020111377 dated 17.03.2020.

44. Von Bock und Polach R., Molyneux D. Model ice: a review of its capacity and identification of knowledge gaps. Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2017 June 25–30, 2017, Trondheim, Norway. Available at: https://www.researchgate.net/publication/318093280_Model_Ice_A_Review_of_its_Capacity_and_Identification_of_Knowledge_Gaps (accessed 05.12.2021).

45. Kostilainen V. Performance of marine propellers in ice-clogged channels. Winter Navigation Research Board, Res. Rpt. 1981, 33: 26 p.

46. Juurmaa K., Segercrantz H. On Propulsion and its Efficiency in Ice. Sixth Ship Technology and Research (STAR) Symposium, Proceedings SNAME, Ottawa, 1981: 229–237.

47. Borusevich V.O., Rusetsky A.A., Sazonov K.E., Soloviev I.A. Sovremennyye gidrodinamicheskie laboratorii. Modern hydrodynamic laboratories. St. Petersburg: FSUE “Krylov State Scientific Center”, 2019: 316 p. [In Russian].

48. Haskins K.L., Courville Z.R., Sodhi D.S., Stanley J.M., Zabilansky L.J., Story J.M. Interaction between Brash Ice and Boat Propulsion Systems. Cold Regions Research and Engineering Laboratory US Army Engineer Research and Development Center, ERDC TR-14-1. 2014: 85 p.

49. Karulina M.M., Karulin E.B. Analytical investigation of propeller operation in brash ice. Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 14–18, 2021, Moscow, Russia. Available at: <https://www.poac.com/Proceedings/2021/POAC21-032.pdf> (accessed 05.12.2021).

50. De Carolis G., Olla P., Pignagnoli L. Effective viscosity of grease ice in linearized gravity waves. J. Fluid Mechanics. 2005, 535: 369–381.

51. *Spravochnik po teorii korablia. T. 1. Gidrodinamika. Soprotivlenie dvizheniiu sudov. Sudovye dvizhiteli*. Handbook of ship theory. In three volumes. V. 1. Hydrodynamics. Resistance to ship traffic. Ship propellers. Leningrad: Sudostroenie, 1985. [In Russian].

52. Eronen H., Riska K. Possibilities to decrease the attained EEDI of the finnish merchant ships. Winter Navigation Research Board, Res. Rpt. 2014, 78: 26 p.

53. Bridges R., Riska K., Haase A. Experimental Tests on the Consolidation of Broken and Brash Ice. Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2019, Delft, The Netherlands. Available at: https://www.researchgate.net/publication/337007935_Experimental_Tests_on_the_Consolidation_of_Broken_and_Brash_Ice (accessed 05.12.2021).