

ЛЕДОВАЯ ХОДКОСТЬ СУДОВ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ ПОЛЕЙ СПЛОЧЕННОГО ЛЬДА. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД

А. А. Добродеев^{1,2}, К. Е. Сазонов^{1,2}, А. М. Жидкова^{1,3}

¹ Крыловский государственный научный центр (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

³ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала

С. О. Макарова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 7 февраля 2026 г.

Для цитирования

Добродеев А. А., Сазонов К. Е., Жидкова А. М. Ледовая ходкость судов в эксплуатационных условиях полей сплоченного льда. Экспериментальный подход. — Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 3. — С. 475—484. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-3-475-484.

Представлены экспериментальные результаты выполненных в ледовом бассейне Крыловского государственного научного центра исследований самостоятельного движения крупнотоннажных судов ледового плавания при сложных эксплуатационных условиях — в сплоченных полях крупнобитого льда и обломках полей, достаточно часто встречающихся в Арктике. Эксперимент проводился с использованием двух моделей крупнотоннажных судов, причем одна из них двигалась в указанных условиях в режиме свободного самохода, а другая — в режиме самохода в жесткой запряжке. Описанный подход к эксперименту позволил получить более комплексные данные о характере движения судна в полях сплоченного льда. Результаты исследования показывают, что в рассмотренных условиях ледовое сопротивление судна может возрасти на 50–60%. В работе сформулированы трудности, которые возникают при проведении такого рода экспериментов в ледовых бассейнах. Сделан вывод о необходимости продолжить изучение сложных условий, возникающих при эксплуатации крупнотоннажных судов в Арктике.

Ключевые слова: эксплуатационные условия, поля сплоченного льда, крупнотоннажное судно, ледовый бассейн.

Введение

При проектировании ледоколов и судов ледового плавания характеристики их ледопроеходимости определяются для так называемых эталонных ледовых условий, под которыми обычно понимают ровный ледяной покров (припайный лед) и мелкобитый лед (лед в канале за ледоколом). Более чем полуторавековой опыт создания таких судов показывает, что если проектируемое судно имеет хорошие показатели ледовой ходкости в этих эталонных условиях, то оно достаточно хорошо может эксплуатироваться и в любых других ледовых условиях.

Функционирование современных морских транспортных систем, специализирующихся на вывозе различных полезных ископаемых из районов добычи в арктическом регионе России, показывает [1], что для повышения их эффективности уже на стадии проектирования необходима информация о ледовых качествах судна в различных эксплуатационных условиях. Такая информация также требуется для создания моделей эксплуатации судна [2]. До сих пор сведения об эксплуатационных характеристиках судна при его движении в различных ледовых условиях в основном основывались на данных натурных наблюдений, которые для судов предыдущего поколения были обработаны и обобщены специалистами



Рис. 1. Сжатый дрейфующий лед в юго-восточной части акватории Карского моря
Fig. 1. Compressed drift ice in the southeastern part of the Kara Sea

Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) [3; 4]. К сожалению, многие рекомендации, полученные в этих исследованиях, в настоящее время устарели из-за кардинального изменения характера судоходства в Арктике [5]. В первую очередь это произошло из-за повсеместного использования крупнотоннажных судов, ширина которых превосходит ширину любого из ныне существующих ледоколов. Это обстоятельство часто не позволяет использовать тактические приемы проводки судов, которые ранее успешно применялись. Так, современные ледоколы не могут осуществлять буксировку вплотную крупнотоннажного судна [6]. Вторым фактором является внедрение винто-рулевых колонок в качестве основных движительных комплексов ледоколов и судов ледового плавания. Такие движители существенно повышают их ледовые качества (возможность движения по льду задним ходом, повышенная маневренность и пр.).

В настоящее время интенсивное развитие транспортных систем в российской Арктике исключает возможность применения традиционного подхода к изучению влияния эксплуатационных условий на ледовую ходкость судов, который заключался в постепенном накапливании информации об особенностях движения судов в различных ледовых условиях с последующим обобщением полученных результатов. Информацию о влиянии эксплуатационных условий, хотя бы приближенную, необходимо иметь уже сейчас. Единственный способ, обеспечивающий ее получение в сжатые сроки, — модельный экспе-

римент в ледовом бассейне [7]. Для этого в ледовых бассейнах необходимо расширить номенклатуру ледовых условий, которые в них воспроизводятся.

Данная статья посвящена опыту ледового бассейна Крыловского государственного научного центра (КГНЦ) по разработке и внедрению новых видов экспериментов, направленных на воспроизведение эксплуатационных ледовых условий. В ней рассмотрены эксперименты по движению судов в сплоченных крупнобитых льдах.

Методы и объекты исследования

Поля сплоченного льда. Вынесенное в подзаголовок название является довольно условным. Рассматриваемые ледовые условия соответствуют широко распространенной в арктическом регионе ситуации, при которой судну иногда приходится преодолевать весьма обширные сплоченные поля, представляющие собой смесь различных ледяных образований: крупно- и мелкобитый лед, обломки полей, относительно небольшие торосы на их стыках, наслоненный лед и пр. [8]. Сплоченность описанных ледовых массивов составляет 8—10 баллов. Толщина, как правило, неоднородна. Поскольку сплоченность не всегда достигает 10 баллов, существуют небольшие пространства чистой воды, в которых происходит процесс ледообразования. Некоторое представление о таких образованиях дает рис. 1.

Важной особенностью рассматриваемых ледяных образований является наличие зон торосения и подсосов на границах контакта крупнобитого льда и обломков ледяных полей, что представляет трудность

даже для движения мощных ледоколов. Подсоны, формирующие наслонный лед, чаще всего происходят в относительно тонких льдах толщиной до 40 см. В более толстых льдах наслонный лед формируется реже, скорее всего, при торосообразовании.

Торосы представляют собой холмообразные нагромождения взломанного льда, образовавшиеся в результате сжатия. Визуальные оценки характеристик зон торования на границах сжатого дрейфующего льда, выполненные в июне 2023 г. в юго-восточной части акватории Карского моря [9], показывают, что высота зон нагромождения редко превышает 1—1,2 м. При этом средняя толщина поля сплоченного льда может быть достаточно большой:

1 м и более. Связь между толщиной льда, из которой образовался торос, и высотой его паруса часто описывается предложенной в [10] формулой

$$H_s = 3,73\sqrt{h_b}, \quad (1)$$

где H_s — высота паруса, м; h_b — толщина блока льда, которая для недавно образовавшихся торосов равна толщине ледяного покрова.

Очевидно, что эта формула плохо описывает наблюдаемые торосы. На наш взгляд, можно выделить несколько причин такого расхождения. Во-первых, как указано выше, поля сплоченного льда всегда содержат фрагменты более тонких льдов, которые при возникновении в ледяном покрове сжимающих усилий будут тороситься в первую очередь [11]. Это подтверждает рис. 2, заимствованный из указанной работы. На нем представлена гистограмма распределения толщин блоков льда, слагающих торос. Эта гистограмма аппроксимирована экспоненциальным законом распределения с средним значением $\bar{h}_b = 0,6$ м.

Во-вторых, при изучении в натурных условиях морфометрических характеристик торосистых образований для исследований обычно выбираются наиболее крупные торосы. Такой выбор мог повлиять на назначение численного коэффициента в формуле (1) в сторону некоторого завышения высоты паруса.

В-третьих, максимальная высота паруса формируется в условиях наличия достаточно сильных сжатий и достаточной продолжительности процесса торосообразования. Такие условия чаще реализуются при взаимодействии значительных по размеру ледяных образований: крупных обломков полей и ледяных полей. В этом случае торование при взаимодействии таких образований не приводит к локальным изменениям поля сжимающих напряжений,

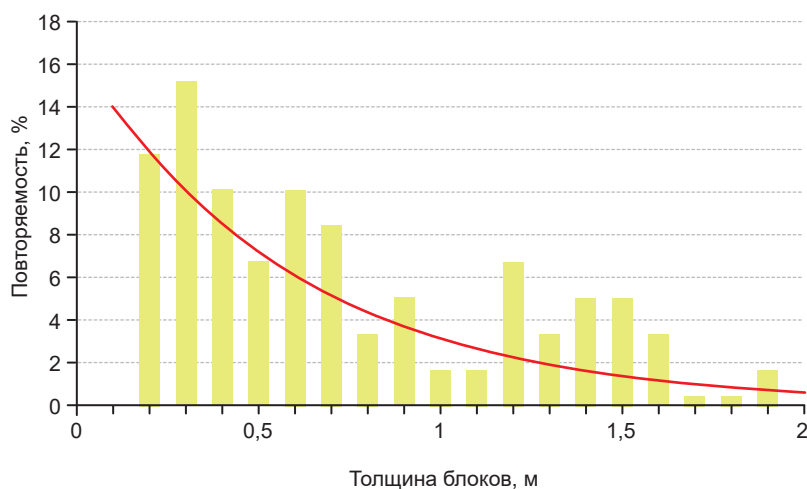


Рис. 2. Гистограмма и плотность распределения толщины блоков льда, слагающих торосы [11]

Fig. 2. Histogram and density distribution of the thickness of ice blocks forming hummocks [11]

что позволяет этому процессу продолжаться достаточно долго.

В случае же сплоченных полей, состоящих из крупнобитого льда и относительно небольших обломков полей (характерный размер незначительно превышает 100 м), складывается несколько иная ситуация. Процесс торосообразования в некоторой точке такого поля может приводить к весьма значительному перераспределению локального поля сжимающих напряжений, которые связаны с перемещением льдин. Это приводит к тому, что время, затраченное на торование в данном конкретном месте поля, может быть довольно небольшим, что не позволит сформироваться большому торосу. Если поле сплоченного льда находится в зоне сжатия, то, скорее всего, торование происходит в некоторых его точках, где напряжения достигают критического значения. Процесс торования вызывает дополнительные перемещения льдин, которые приводят к локальному перераспределению поля напряжений и возможному началу торования в другом месте.

В [12] дано соотношение между глубиной килля и высотой паруса торосов Карского моря, которое в первом приближении может дать оценку глубины килля нагромождений, образующихся вследствие сжатия дрейфующего льда:

$$H_k = 2,7H_s + 2,8, \quad (2)$$

где H_k — глубина килля тороса, м.

Расчет по этой формуле дает ориентировочные значения килля тороса в поле сплоченного льда, которые приведены в табл. 1.

Эти данные показывают, что киль тороса в сплоченных полях, скорее всего, не превышает осадки ледокола и транспортного судна, поэтому имеется большая вероятность того, что судно может преодолеть большинство торосов без остановки [13].

Таблица 1. Ориентировочные значения килля тороса

Table 1. Approximate values of the hummock keel

Высота паруса, м	Глубина килля, м
0,6	4,42
0,8	4,96
1,0	5,50
1,2	6,04
1,4	6,58
1,6	7,12

Воспроизводство сплоченных полей в ледовом бассейне. Эксперименты проводились в ледовом бассейне КГНЦ, имеющем рабочую длину чаши 80 м, ширину 10 м и глубину 2 м. Подробно особенности этого бассейна, способы приготовления в нем моделированного льда и основные методики проведения модельных испытаний изложены в [7].

Для создания в ледовом бассейне условий, которые в какой-то мере воспроизводят поля сплоченного льда, применяется следующая технология. В бассейне приготавливается сплошное ровное поле моделированного льда с заданными значениями толщины и прочности на изгиб. Затем это поле разрезается на отдельные фрагменты, имеющие характерные размеры, соответствующие размерам крупнобитого льда и обломков ледяных полей с учетом выбранного для эксперимента масштаба моделирования. Как правило, форма этих фрагментов

в плане близка к квадратной. Они распределяются с максимально возможной в условиях ледового бассейна степенью хаотичности относительно друг друга. Высокая сплоченность полученного ледяного образования достигается путем сжатия обломков ковшем буксировочной тележки. Чтобы приготовленные фрагменты льда можно было поджать, в конце бассейна остается часть неразрушенного первичного поля ровного льда. Типичный вид полученного в бассейне сплоченного поля льда представлен на рис. 3.

Полученное в ледовом бассейне ледяное образование представляет собой смесь крупнобитого льда и обломков ледяных полей с вкраплениями мелкобитого и тертого льда. Поскольку толщина льда в ледовом бассейне уменьшена в соответствии с критериями подобия, на стыках фрагментов льда практически невозможно создать торосистые образования при их поджатии буксировочной тележкой. Это происходит из-за того, что тонкому льду энергетически выгоднее сформировать подсов, чем тороситься. Исходя из этого, в экспериментах подсовы трактовались как небольшие торосы, что соответствует известному подходу описывать торосистое образование льдом большей толщины (см., например, [3]).

Объекты исследования. Исследовались две модели современных крупнотоннажных судов ледового плавания. Первое имело длину 290 м, ширину 49 м и осадку 14,5 м. Оно было оборудовано тремя винто-рулевыми колонками. Второе судно имело длину 280 м, ширину 44 м и осадку 14,5 м. Движительный комплекс представлял собой два традиционных гребных винта, расположенных на выкружках. Оба судна имели развитую цилиндрическую вставку.



Рис. 3. Движение судна в поле сплоченного льда в ледовом бассейне
Fig. 3. The ship model towing in the field of compacted ice in the ice tank

Результаты экспериментов

Эксперименты выполнены применительно к крупнотоннажным транспортным судам высокого ледового класса Arc7 (далее по тексту — судно 1 и судно 2), имеющим умеренно ледокольную форму носовой оконечности и схожие размеры, преимущественно отличающаяся лишь шириной корпуса на 6 м и количеством движителей — на судне 1 их два, а на судне 2 три. Исследования в сплоченных полях крупнобитого льда осуществлялись двумя способами: с помощью полностью самоходных моделей и при буксировке тележки бассейна моделей с работающими движителями. В первом случае в экспериментах фиксировались возможность преодоления моделью препятствия на режимах движения передним ходом и при работе набегам, а также средние показатели скорости и времени, затраченного на преодоления препятствия. Во втором случае измерялись ледовое сопротивление модели и характеристики работы движительного комплекса. Использование разных подходов к проведению эксперимента позволяет более комплексно проанализировать особенности движения крупнотоннажных судов в сплоченных полях.

Испытание самоходной модели выполнялось только применительно к одному из двух рассматриваемых судов — судно 2. Во время эксперимента частота вращения движителей выбиралась соответствующей 100%-ному уровню мощности судна. Буксировочной тележкой бассейна модель разгонялась до заданной начальной скорости, а в непосредственной близости от границы ледяного образования она переводилась в режим чистого самохода. Движение модели в ледяном образовании осуществлялось вплоть до полного выхода носовой оконечности за его пределы или остановки модели в ледяном поле (рис. 4). Если модель судна не могла пройти ледяное



Рис. 4. Движение модели крупнотоннажного судна в сплоченных полях в режиме свободного самохода

Fig. 4. Self-propulsion movement of a supershhip model in compacted ice fields

образование с первой попытки, то в дальнейшем моделировалась работа набегам. После остановки модель отводилась назад на некоторое заданное расстояние. Затем выполнялся разгон буксируемой модели до заданной скорости, и процесс внедрения модели в ледяное образование повторялся. Выполнялось столько набегов, сколько необходимо для преодоления препятствия.

Исследования по прохождению судном сплоченных полей льда были выполнены при двух толщинах ровного льда — 1,5 и 2,0 м. Прочность ровного льда на изгиб составила 500 кПа. Выбранные значения толщины льда являются средними показателями ледовых условий Арктики в период зимне-весенней навигации судов. Изучено движение модели крупнотоннажного судна как носом, так и кормой вперед.

В табл. 2 приведены полученные результаты измерений скорости движения и времени прохождения смоделированной зоны сжатого дрейфующего льда.

Эксперименты с буксируемыми моделями, у которых работали движители, были организованы сле-

Таблица 2. Результаты проведенных модельных испытаний по преодолению сплоченных полей дрейфующего льда судном. Пересчет на натурные условия

Table 2. Results of model tests of vessel navigation through compacted drift ice fields. Full-scale data

№	Толщина льда, м	Направление движения судна	Время преодоления, с	Ширина ледяного образования, м	Средняя скорость, уз
1	1,5	Передний ход	3 мин 10 с	500,0	5,1
2	2,0	Передний ход	26 мин 50 с *	1000,0	Набегами (5 попыток)
3	1,5	Задний ход	5 мин 40 с	700,0	4,0
4	2,0	Задний ход	10 мин 10 с	700,0	1,9

* Без учета времени отхода судна на заднем ходу.

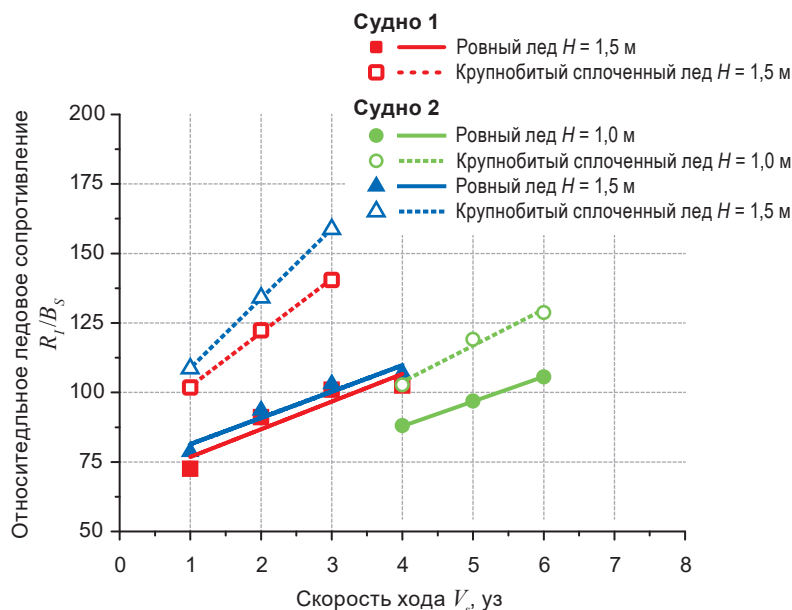


Рис. 5. Сопоставление данных измерений ледового сопротивления крупнотоннажных судов класса Arc7 при движении в ровном (сплошные линии) и сплоченном крупнобитом льду (пунктирные линии)

Fig. 5. Comparison of ice resistance measurements for superships Arc7-class when navigating in flat (solid lines) and compacted patch ice (dotted lines)

дующим образом. Сначала в моделированном поле ровного льда проводились обычные испытания для получения данных о его сопротивлении движению модели. Эти данные необходимы для дальнейшего анализа влияния изучаемых ледовых условий на параметры ледовой ходкости. После первой стадии испытаний в ледовом бассейне были приготовлены ледовые условия, соответствующие сплоченным полям дрейфующего льда (см. рис. 3). Далее в этих условиях проводилась буксировка модели с работающими движителями. Обработка полученных результатов осуществлялась в соответствии с принятой в КГНЦ методикой [7]. Испытания проводились при толщине льда 1,5 м.

Результаты определения ледового сопротивления моделей крупнотоннажных судов в ровных сплошных льдах и сплоченных полях дрейфующего льда были сопоставлены и представлены зависимостью относительного ледового сопротивления R_l/B_s от скорости движения судна V_s для случаев движения по льду различной толщины H (рис. 5). Данное сравнение демонстрирует очевидное падение ледопроеходимости в условиях сплоченных крупнобитых льдов. Ледовое сопротивление R_l возрастает примерно в 1,5 раза.

Обсуждение результатов

Необходимо отметить, что приведенные в статье результаты во многом носят предварительный характер. В настоящее время в практику работы ледового бассейна КГНЦ внедряется новый тип ледовых условий, в которых можно испытывать модели судов и получать необходимые для их проектирования

данные, а также исходную информацию для создания имитационных моделей движения судов во льдах.

Приведенные результаты позволяют сделать некоторые выводы.

По всей видимости, поля сплоченного дрейфующего льда представляют собой довольно существенное препятствие для движения судов. Наблюдение процесса разрушения льда, выполненное через подводные иллюминаторы ледового бассейна КГНЦ, показывает, что в сплоченном крупнобитом льду под корпусом судна образуется значительная ледовая рубашка, которая за время пробега в эксперименте распространяется за пределы миделевого сечения (рис. 6). Также можно отметить большие скопления разрушенного льда вдоль бортов судна. Скорее всего, возможность формирования судном сплоченно-

го крупнобитого льда непрерывным ходом имеет ограничение, которое лежит где-то между полтора- и двухметровым льдом. В этом убеждают данные экспериментов, выполненных как в режиме свободного самохода, так и при буксировочных испытаниях, которые показали рост сопротивления на 50—60%. Можно уверенно утверждать, что форма носовой оконечности судна будет оказывать существенное влияние на возможность движения непрерывным ходом, при этом суда с ледокольной носовой оконечностью будут иметь заметное преимущество.

Для судов, оборудованных винто-рулевыми колонками, существует принципиальная возможность движения в этих тяжелых ледовых условиях кормой вперед. Согласно результатам многих исследований, движение кормой вперед особенно эффективно в толстых льдах (см., например, [14]). Выполненные эксперименты показывают, что в двухметровых льдах крупнотоннажное судно может двигаться кормой вперед, но со скоростью меньше двух узлов. Тем не менее существенным препятствием для осуществления этого маневра являются трудности, возникающие при развороте крупнотоннажного судна во льдах для смены направления движения носом или кормой вперед [15].

Приведенные в статье результаты относятся к довольно суровым ледовым условиям, когда поля сплоченного льда сформированы относительно толстыми льдами. Скорее всего, такие поля формируются из более тонких льдов. Но и в этом случае ледовые условия остаются весьма труднопроходимыми для судов, особенно крупнотоннажных. В ле-

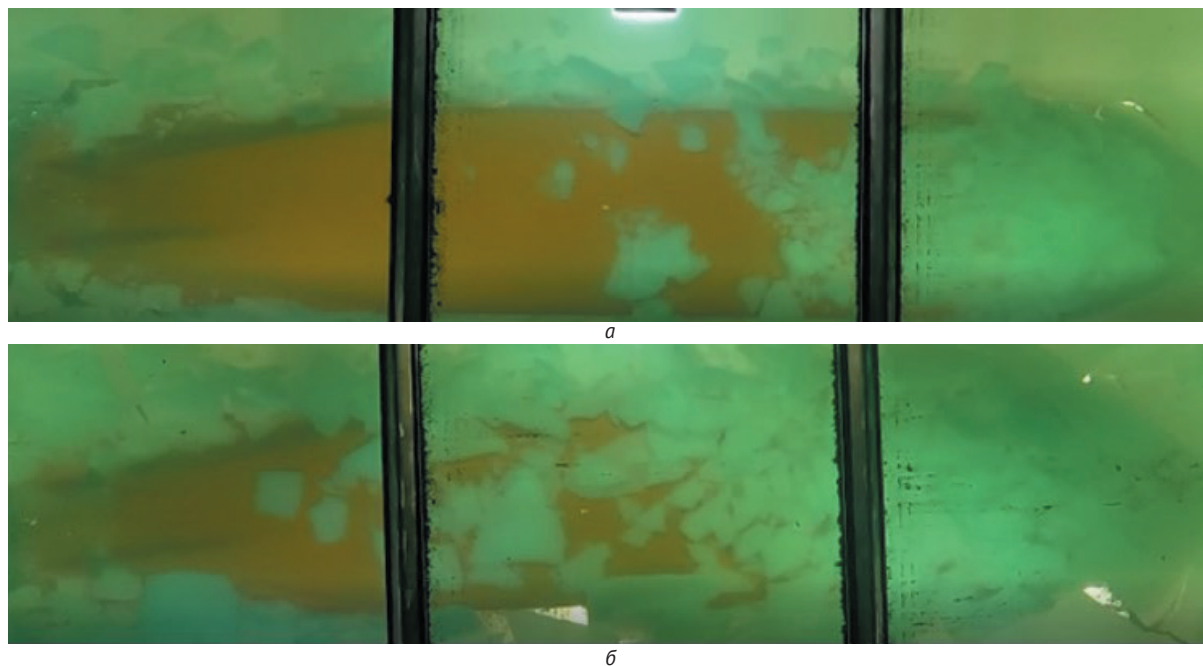


Рис. 6. Вид на подводную часть корпуса судна при движении в ровном (а) и сплоченном (б) крупнобитом льду
Fig. 6. View of the underwater part of the vessel's hull when moving in flat (a) and compacted (б) patch ice

довом бассейне КГНЦ предполагается продолжить подобные исследования, распространив их на более тонкие льды, а также на изучение возможности оказания ледоколом помощи судну при движении в указанных условиях.

При рассмотрении приводимых в статье экспериментальных результатов необходимо обсудить некоторые трудности, имеющие место при выполнении модельных исследований. Эти трудности связаны со следующим. В начале статьи приведены обоснования того, что в сплоченных полях, скорее всего, формируются торосистые образования относительно небольших размеров. Далее сказано, что при формировании в ледовом бассейне полей сплоченного льда невозможно создать на стыках обломков льда и обломков полей торосистые образования. Тонкий моделированный лед может образовывать только подсовы. В описанной методике эти подсовы предлагается трактовать как небольшие торосы. Это довольно сильное допущение, оно требует дополнительного обоснования, которое можно было бы получить, проведя целый ряд специальных экспериментальных исследований. К сожалению, загрузка ледового бассейна КГНЦ весьма значительна, и приступить к их выполнению в настоящее время не представляется возможным. Поэтому ниже приводятся некоторые косвенные обоснования этой гипотезы.

Специалисты ААНИИ, изучающие ледяной покров как среду для судоходства, давно разработали подход, позволяющий описывать торосистость ледяного покрова с помощью характеристик ровного льда, соответствующим образом увеличивая его толщину [3; 4]. Иными словами, движению судна в тороси-

стых льдах ставилось в соответствие движение того же судна в ровных льдах, но большей толщины. Недостатком этого подхода является то, что в качестве входной информации для определения поправки к толщине ровного льда использовалась характеристика торосистости льда, в которой используется отношение площади льда, покрытой торосами, к общей площади. Увеличение торосистости на 1 балл дает увеличение толщины ровного льда на 25%. При этом, как следует из графиков Г. Н. Сергеева [4], торосистость в 1 балл не приводит к увеличению толщины льда. Оценим по этим графикам увеличение ледового сопротивления при различной торосистости льда. Для этого воспользуемся известным соотношением пропорциональности между ледовым сопротивлением и толщиной льда $R_l \propto h^{1.5}$ [16]. Расчет показывает, что при торосистости 2 балла увеличение ледового сопротивления составляет 1,32, при торосистости 3 балла — 1,75. Указанные величины достаточно близки к значениям, полученным в буксировочном эксперименте. Повидимому, при небольших изменениях технологии проведения эксперимента, например, подмораживании подготовленного поля сплоченного льда для небольшого смерзания подсонов, можно несколько улучшить полученные результаты.

Еще одна трудность при проведении экспериментальных исследований в режиме буксировки модели состоит в следующем. Очевидно (см. рис. 1, 3 и 4), что ледяная среда, воспроизводимая в ледовом бассейне, обладает большой степенью неоднородности. Это обстоятельство накладывает на эксперимент дополнительные требования, которые заключаются в том, что длина пробега модели при постоянных

значениях скорости должна быть достаточно большой для того, чтобы некоторое усреднение результата могло произойти.

Проведем оценку этой дистанции. Ранее указывалось, что характерный размер обломков льда в сплоченных полях в среднем незначительно превышает 100 м. Тогда тот же размер обломка в модельном эксперименте при наиболее часто используемых масштабах моделирования 1:30—1:40 будет иметь размер порядка 3 м. В направлении движения модели на стыках обломков льда, как правило, формируется подсов. Таким образом, движение модели заключается в преодолении обломка льда и подсова. Представляется, что для получения усредненных значений необходимо преодоление как минимум пяти характерных особенностей льда. Тогда дистанция должна быть длиной порядка 15 м. К этой величине необходимо прибавить еще длину модели, которая составляет 5—7 м. В результате окончательная оценка дает величину порядка 20 м.

Выводы

В данной статье продемонстрирована возможность экспериментального изучения в ледовых бассейнах определения характеристик ледовой ходкости крупнотоннажных судов ледового плавания при движении в тяжелых эксплуатационных условиях. В качестве таких условий в статье рассмотрено движение судна в сплоченных полях крупнобитого льда и обломков полей. Полученные экспериментальные данные убедительно показывают, что в рассматриваемых условиях ледовое сопротивление может существенно возрасти, что, несомненно, необходимо учитывать в различных моделях движения судов в Арктике. Указанная динамика ледового сопротивления может привести к необходимости движения судна в режиме набега или (для судов, оборудованных винто-рулевыми колонками) к движению кормой вперед.

По мнению авторов, использованный в настоящей работе экспериментальный подход к изучению движения судов в тяжелых эксплуатационных условиях является одной из немногих возможностей получения информации о протекающих процессах. К сожалению, натурные наблюдения с судов по ряду причин не могут содержать необходимые для анализа этого явления данные.

Модельный эксперимент, естественно, имеет свои ограничения и трудности. Некоторые из них кратко сформулированы в данной статье. Но, как считают авторы работы, возможность фиксации в модельном эксперименте большого количества параметров, которые невозможно определить в натурных условиях (например, упор движителя) или крайне сложно это сделать, перекрывает имеющиеся у него недостатки. Сказанное не исключает необходимости дальнейшего совершенствования технологий проведения подобных экспериментов.

Финансирование

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

Литература/References

1. Крупнов Г. К., Обидин Ю. И., Сазонов К. Е. и др. Морские транспортно-технологические системы: история, современность, перспективы. Аналитический обзор. — СПб.: Крылов. гос. науч. центр, 2019. — 162 с.
Krupnov G. K., Obidin Yu. I., Sazonov K. E., Dobrodeev A. A., Grigor'ev A. M., Gushchin I. V. Marine transport and technological systems: history, modernity, prospects. Analytical review. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2019, 162 p. (In Russian).
2. 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.
Tarovik O. V. Models for forecasting the parameters of ship voyages in the Arctic: existing approaches and possible development paths. Arctic: Ecology and Economy, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 422—435. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-422-435. (In Russian).
3. Бузуев А. Я. Влияние природных условий на судоходство в замерзающих морях. — Л.: Гидрометеоздат, 1982. — 103 с.
Buzuev A. Ya. The influence of natural conditions on navigation in freezing seas. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1982, 103 p. (In Russian).
4. Бузуев А. Я., Дубровцев В. Ф., Захаров В. Ф., Смирнов В. И. Условия плавания судов во льдах Северного полушария / Гл. упр. навигации и океанографии МО СССР. — М., 1988. — 280 с.
Buzuev A. Ya., Dubrovcev V. F., Zaharov V. F., Smirnov V. I. Conditions for navigation of ships in the ice of the Northern Hemisphere. Glavnoe upravlenie navigatsii i okeanografii MO SSSR. Moscow, 1988, 280 p. (In Russian).
5. Добродеев А. А., Сазонов К. Е. Как изменилось судоходство в Арктике в XXI веке // Природа. — 2022. — № 11. — С. 9—28.
Dobrodeev A. A., Sazonov K. E. How shipping in the Arctic has changed in the 21st century. Priroda [Nature], 2022, no. 11, pp. 9—28. (In Russian).
6. Добродеев А. А., Сазонов К. Е. Экспериментальные исследования возможности проводки ледоколом крупнотоннажных судов при буксировке вплотную // Вестн. Гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14, № 5. — С. 645—655. — DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.
Dobrodeev A. A., Sazonov K. E. Experimental studying a possibility of close-coupled towing of large-sized

- vessels by icebreaker. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova [Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping], 2022, no. 14 (5), pp. 645—655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655. (In Russian).
7. Сазонов К. Е. Модельный и натурный эксперимент в морской ледотехнике. — СПб.: Крылов. гос. науч. центр, 2021. — 306 с.
- Sazonov K. E. Model and full-scale experiment in marine ice engineering. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2021, 306 p. (In Russian).
8. Dobrodeev A. A. Estimation of uncertainty for measurement of ship ice resistance in ice basin. Behavior of materials under impact, explosion, high pressures and dynamic strain rates. Advanced Structured Materials. [S. l.], Springer, 2023, pp. 279—294. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17073-7_18.
9. Бокатова Е. А., Добродеев А. А., Сазонов К. Е. и др. Ледовые натурные испытания атомных ледоколов «Арктика» и «Сибирь» // Тр. Крылов. гос. науч. центра. — 2023. — Т. 3, № 405. — С. 71—80. — DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-71-80.
- Bokatova E. A., Dobrodeev A. A., Sazonov K. E., Babich E. M., Krupina N. A. Full-scale ice tests of the nuclear-powered icebreakers “Arktika” and “Sibir”. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra [Krylov State Research Centre Proceedings], 2023, vol. 3, no. 405, pp. 71—80. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-71-80. (In Russian).
10. Strub-Klein L., Sudom D. A. Comprehensive analysis of the morphology of first-year sea ice ridges. Cold Reg. Sci. Technol., 2012, 82, pp. 94—110.
11. Харитонов В. В. О распределении основных морфометрических характеристик торосистых образований // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2025. — Т. 71., № 3. — С. 318—333. — URL: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-3-318-333>.
- Kharitonov V. V. On the distribution of the main morphometric characteristics of hummocky formations. Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research], 2025, vol. 71, no. 3, pp. 318—333. Available at: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-3-318-333>. (In Russian).
12. Миронов Е. У., Порубаев В. С. Формирование гряд торосов в прибрежной части Карского моря и их морфометрические характеристики // Соврем. проблемы науки и образования. — 2012. — № 4. — 8 с.
- Mironov E. U., Porubaev V. S. Formation of hummock ridges in the coastal part of the Kara Sea and their morphometric characteristics. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education], 2012, no. 4, 8 p. (In Russian).
13. Сазонов К. Е. Расчет максимального усилия, действующего на судно при взаимодействии с торосами // Судостроение. — 2013. — № 5. — С. 30—31.
- Sazonov K. E. Calculation of the maximum force acting on a vessel when interacting with ice hummocks. Sudostroenie [Shipbuilding], 2013, no. 5, pp. 30—31. (In Russian).
14. Цой Л. Г., Андрюшин А. И., Штрек А. А. Обоснование основных параметров перспективных крупнотоннажных газовозов для Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2013. — № 3 (97). — С. 46—56.
- Tsoy L. G., Andryushin A. V., Shtrek A. A. Substantiation of principal parameters of prospective large capacity LNG carriers for the Arctic. Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research], 2013, no. 3 (97), pp. 46—56. (In Russian).
15. Таровик О. В., Казанцев М. А. Оценка длительности разворота транспортных судов двойного действия во льдах на основе навигационного моделирования // Науч.-техн. сб. Рос. морского регистра судоходства. — 2022. — № 68—69. — С. 4—19.
- Tarovik O. V., Kazantsev M. A. Estimation of the turning maneuver duration of double acting ships in ice using navigation simulation. Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping], 2022, no. 68—69, pp. 4—19. (In Russian)
16. Сазонов К. Е. Скейлинговые соотношения в ледовой ходкости судов // Мор. вестн. — 2010. — № 3 (35). — С. 104—105.
- Sazonov K. E. Scaling relationships in ice propulsion performance of ships. Morskoj Vestnik [Marine Herald], 2010, no. 3 (35), pp. 104—105. (In Russian).

Информация об авторах

Добродеев Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, заместитель начальника отделения по развитию, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., д. 44); доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лощманская ул., д. 3), e-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru.

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

Жидкова Анастасия Михайловна, руководитель проектов, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., д. 44), соискатель, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова (198035, Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., д. 5/7), e-mail: a_zhidkova@ksrc.ru

ICE PERFORMANCE OF SHIPS IN OPERATIONAL CONDITIONS OF COMPACT ICE FIELDS. AN EXPERIMENTAL APPROACH

Dobrodeev, A. A.^{1,2}, Sazonov, K. E.^{1,2}, Zhidkova A. M.^{1,3}

¹ Krylov State Research Centre (St. Petersburg, Russian Federation)

² Saint Petersburg State Marine Technical University (St. Petersburg, Russian Federation)

³ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on February 7, 2026

For citing

Dobrodeev A. A., Sazonov K. E., Zhidkova A. M. Ice performance of ships in operational conditions of compact ice fields. An experimental approach. *Arctic: Ecology and Economy*, 2026, vol. 16, no. 3, pp. 475—484. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-3-475-484. (In Russian).

Abstract

The paper presents the experimental results of research conducted in the ice tank of the Krylov State Research Centre to study independent movement of superships ice-class in severe operating conditions of compacted patch ice and ice floes that are quite common in the Arctic. The ice-tank experiment was carried out using two supership models, one of which navigated under above-mentioned conditions in free-running mode, while the other navigated in self-propelled mode under rigid harness. This experimental approach allowed the researchers to obtain more comprehensive data on the ship performance in compacted ice fields. The presented research results demonstrate that, under these conditions, vessel ice resistance can increase by 50—60%. The paper identifies the difficulties encountered in conducting such experiments in ice tanks. The researchers conclude that further study is required to investigate severe operation conditions for superships navigating in the Arctic.

Keywords: *operating conditions; fields of compacted ice, supership, ice tank.*

Funding

This study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-19-00039-П “Theoretical basis and applied tools to create a system for intelligent fleet planning and decision support in Arctic shipping” (<https://rscf.ru/project/23-19-00039/>).

Information about the authors

Dobrodeev, Aleksei Alekseevich, PhD of Engineering Science, Deputy Head of the Development Department, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe highway, St. Petersburg, Russia, 196158); Associate professor, St. Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya St., St. Petersburg, Russia, 190121), e-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru.

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

Zhidkova, Anastasiia Mikhailovna, Project Manager, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe highway, St. Petersburg, Russia, 196158); Applicant, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (5/7, Dvinskaya St., Saint-Petersburg, Russia, 198035), e-mail: a_zhidkova@ksrc.ru.

© Dobrodeev A. A., Sazonov K. E., Zhidkova A. M., 2026