

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655

EXPERIMENTAL STUDYING A POSSIBILITY OF CLOSE-COUPLED TOWING OF LARGE-SIZED VESSELS BY ICEBREAKER

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

¹ — Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

² — St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russian Federation

The experimental studies in the ice model tank of the Krylov State Research Centre are described in the paper. This study aimed at researching a possibility of close-coupled towing of large-sized vessels by icebreaker. The displacement of considered commercial vessels is several times greater than the icebreaker displacement. Due to the fact that an amount of cargo transported along the Northern Sea Route is growing every year and new terminals are being constructed for the export of raw materials extracted in the Arctic, it has been shown in the paper that new transport vessels with high cargo capacity should be designed and built for the efficient operation of terminal. It has also been shown that the organization of independent year-round operation of such vessels in the Arctic region is extremely difficult, therefore, even at the stage of their design it's important to consider the possibility of their escorting by existing icebreakers. The feasibility of close-coupled towing in the escorting of large-sized vessels with low ice class by icebreakers in the Arctic waters has been studied in the paper. The models of the greatest existing nuclear-powered icebreaker and conditional bulk carrier are used as an object of the ice model tests. The study of the close-coupled towing features in the continuous flat ice conditions is carried out at straightforward movement and gyration, as well as for the case of an emergency stop of the icebreaker. During ice model tests the ice forces acting on the hull of the model are measured, as well as the load on a towing notch with rubber fenders in the stern of icebreaker and the tension in the wire rope. The comparison of the wire rope tension with its breaking force is taken as a criterion to assess the possibility of the close-coupled towing operation. The results can be used as the basis for choosing the hull concept of the future large-sized vessels, its ice class and main dimensions and in strategic simulations of Arctic marine transport systems.

Keywords: icebreaker, large-sized vessel, close-coupled towing, ice model tank, model.

For citation:

Dobrodeev, Aleksei A., and Kirill E. Sazonov. "Experimental studying a possibility of close-coupled towing of large-sized vessels by icebreaker." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 645–655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.

УДК 623.828:532.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВОДКИ ЛЕДОКОЛОМ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ ПРИ БУКСИРОВКЕ ВПЛОТНУЮ

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

¹ — ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский Государственный морской технический
университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье описаны экспериментальные исследования, выполненные в ледовом бассейне Крыловского научного центра, направленные на изучение возможности осуществления буксировки ледоколом вплотную крупнотоннажных судов, водоизмещение которых в несколько раз превышает водоизмещение ледокола. Ввиду того, что количество грузов, перевозимых по трассе Северного морского пути, с каждым годом растет,

а также появляются новые терминалы, предназначенные для вывоза добываемого в Арктике сырья, в выполненной работе показано, что для эффективной работы терминалов важно проектировать и осуществлять строительство новых транспортных судов, основной тенденцией которых является рост их грузовместимости. Приведены доказательства того, что организация самостоятельной круглогодичной эксплуатации таких судов в Арктическом регионе крайне затруднительна, поэтому в рамках данного исследования показано, насколько важно еще на стадии их проектирования рассматривать возможность проводки существующими ледоколами. В частности, изучен вопрос о выполнимости операции буксировки вплотную при проводке в арктических водах крупнотоннажных судов с низким классом ледовых усиления корпуса. В качестве объекта исследований в работе были использованы модели современного атомного ледокола и некоторого условного балкера. Исследование особенностей движения сцепки «ледокол – судно» в сплошном ровном льду проводилось при прямолинейном движении и на циркуляции, а также в случае экстренной остановки ледокола. В ходе экспериментов помимо ледовых сил, действующих на корпус модели, дополнительно измерялись усилия в кранцевом устройстве ледокола, а также натяжения в буксирном тросе. Сравнение величины измеренных усилий в тросе с его разрывным усилием было принято в качестве критерия, позволяющего оценить возможность выполнения операции буксировки вплотную. Полученные результаты служат основанием для выбора концепции корпуса проектируемого крупнотоннажного судна, его ледового класса и главных размерений, а также могут применяться при стратегическом планировании работы Арктической морской транспортной системы.

Ключевые слова: ледокол, крупнотоннажное судно, буксировка вплотную, ледовый бассейн, модель.

Для цитирования:

Добродеев А. А. Экспериментальные исследования возможности проводки ледоколом крупнотоннажных судов при буксировке вплотную / А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 645–655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.

Введение (Introduction)

Большинство морей, которые пересекает трасса Северного морского пути (СМП), в течение длительного периода времени покрыты льдом, что затрудняет их круглогодичное использование. Наличие мощных льдов является серьезным препятствием для судоходства даже в летний период навигации. Развитие судоходства в замерзающих морских бассейнах России в последнее десятилетие характеризуется ростом грузооборота ряда замерзающих портов в зимние месяцы, увеличением числа судов и ледоколов, их техническим совершенствованием, повышением мощности, грузоподъемности, расширением периода судоходства до круглогодичного или его значительным продлением, внедрением методов учета ледовых условий в планирование и организацию судоходства [1].

Обеспечение круглогодичной транспортировки полезных ископаемых, добываемых в Арктической зоне, является приоритетной задачей при освоении месторождений. Одним из способов достижения этой цели является использование транспортных судов высокого ледового класса, имеющих ледокольные обводы корпуса. Однако реализация данного подхода требует больших затрат и преимущественно используется при освоении нефтегазовых месторождений, где регулярность доставки груза является основным критерием эффективности транспортной системы [2].

В настоящей работе рассмотрен вопрос использования для вывоза добываемого сырья с угольных месторождений крупнотоннажных судов, имеющих довольно низкий ледовый класс усиления корпуса. Особенностью использования таких судов в Арктике зачастую является отсутствие требований обеспечения строгого графика поставок. Наиболее важным условием эффективной работы таких транспортных систем является обеспечение большого объема перевозимого сырья наряду с обеспечением безопасности доставки груза.

До появления крупнотоннажных судов одним из основных тактических приемов проводки во льдах являлась буксировка судна вплотную в кормовой выемке ледокола [3]. На практике такой способ проводки применялся для буксировки транспортных судов, ширина которых не превышает ширину ледокола, а водоизмещение буксируемого судна меньше или сопоставимо с водоизмещением буксировщика. Постепенное увеличение тоннажа и главных размерений транспортных судов, эксплуатируемых на арктических акваториях, привело к снижению частоты использования такти-

ческого приема буксировка вплотную. При разработке современных арктических морских транспортных систем такой способ буксировки крупнотоннажных судов обычно не рассматривается [4]. Тем не менее ряд разработчиков новых арктических транспортных систем допускают возможность осуществления буксировки крупнотоннажного судна за ледоколом вплотную для судов с низким ледовым классом.

Целью настоящей работы являлось проведение экспериментальных исследований в ледовом бассейне процесса буксировки крупнотоннажного судна вплотную с современным ледоколом. Результаты данного исследования позволили ответить на вопрос о возможности выполнения такой операции и оценить возникающие при этом трудности. Проведение модельных испытаний является наиболее информативным и точным методом определения показателей ледовой ходкости судов [5] и [6].

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работе в качестве объектов исследования были выбраны новый атомный ледокол типа «Арктика», пр. 22220 (рис. 1, а) и условный балкер типа Nordic Nuluuяaak водоизмещением 100 тыс. т (рис. 1, б), предназначенный для перевозки грузов насыпью, максимальная пропульсивная мощность которого составляет 14 МВт. Ледовый класс, согласно классификации Российского морского регистра судоходства (РС) — Arc4. В течение последних нескольких лет наблюдается рост проведения исследований ледовой ходкости в канале за ледоколом балкеров, не имеющих оптимальной для эксплуатации в ледовых условиях формы обводов [7] и [8]. Это обусловлено высокой стоимостью создания крупнотоннажных судов ледового класса, в то время как постройка серийных судов по существующим проектам обходится в разы дешевле.

Водоизмещение рассматриваемого транспортного судна почти в 3 раза превышает водоизмещение ледокола. Ширина судна незначительно превышает ширину ледокола и сопоставима с шириной образующегося ледового канала. Необходимо отметить, что использованную в процессе экспериментов модель балкера следует считать условной, так как ее теоретический чертеж был разработан специалистами лаборатории ледотехники Крыловского центра по имеющимся чертежам общего расположения.

а)



б)



Рис. 1. Суда, модели которых использовались при проведении экспериментальных исследований:

а — атомный ледокол типа «Арктика», пр. 22220; б — балкер типа Nordic Nuluuяaak

По разработанному теоретическому чертежу балкера была изготовлена физическая модель судна в масштабе 1 : 34,44. Основные характеристики балкера и его модели приведены в таблице. В экспериментах также была использована модель ледокола типа «Арктика», пр. 22220, изготовленная в масштабе балкера. Для проведения испытаний модель была оборудована приспособлениями для имитации буксирных и кранцевых устройств ледокола.

Основные характеристики балкера

Наименование характеристики, единица измерения	Значение	
	Натурное судно	Модель
Длина наибольшая L_{OA} , м	250,0	7,259
Ширина наибольшая B_{OA} , м	38,0	1,103
Осадка по КВЛ T_D , м	15,0	0,436
Осадка балластная T_B , м	13,0	0,378
Диаметр гребного винта D , м	7,8	0,226

Для определения возможности проводки крупнотоннажного балкера атомным ледоколом типа «Арктика» было рассмотрено несколько сценариев, включающих буксировку судна вплотную и самостоятельное движение судна в ледовом канале. Совместная работа судов в ледовых условиях, как правило, может сопровождаться необходимостью смены курса при движении по извилистой траектории или резкой остановкой ввиду возникновения препятствия перед ледоколом и др. Поэтому указанные режимы также были исследованы в ледовом опытовом бассейне.

Для всестороннего изучения особенностей проводки судов модели были оснащены специальным измерительным оборудованием. Кормовая выемка ледокола, предназначенная для размещения в ней форштевня буксируемого вплотную судна, была изготовлена отдельно от основной модели и жестко установлена на корпусе через динамометр, способный измерять горизонтальную нагрузку. Все оборудование буксирной выемки предназначено для защиты буксируемого судна и ледокола от повреждения при взаимных перемещениях [9]. Поэтому в качестве имитатора кранца в кормовой выемке был использован специальный прорезиненный материал умеренной жесткости. Подобные натурные буксирные кранцы состоят из собранных в жгут кусков резины круглого сечения, закрепленных стальным тросом. Для придания ольшей упругости и стойкости к истиранию кранец покрыт слоем растительных или синтетических толстых тросов, а сверху так называемой «кольчугой», состоящей из стальных тросов [10]. При выполнении исследований жесткость кранцев в качестве исходных данных не задавалась, поэтому подбор имитатора выбирался на основании опыта исполнителя и доступной информации.

Для моделирования буксировки вплотную между моделями был натянут имитатор буксирного каната (рис. 2, а). Принцип, взятый за основу для моделирования буксировки, показан на рис. 2, б. Точки крепления каната на модели в точности соответствуют расположению буксирных устройств на балкере и ледоколе.

а)



б)



Рис. 2. Расположение буксирного каната на модели (а) и в натурных условиях (б)

Как видно на рис. 2, а, имитатор буксирного каната снабжен динамометром. Оценка возможности осуществления буксировки вплотную определялась по среднему значению нагрузки, возникающей в канате, которая не должна превышать разрывного усилия. В целом проведенные эксперименты включали буксировочные испытания моделей ледокола и балкера с работающими гребными винтами и самоходные испытания модели балкера, которые проводились в соответствии с принятой в ледовом бассейне методикой [11]. В ходе буксировочных модельных испытаний измерялись следующие параметры:

- скорость буксировочной тележки;
- буксировочная сила;
- сила натяжения в буксирном канате;
- нагрузка, действующая на элемент корпуса ледокола с кормовой выемкой.

В ходе проведения самоходных испытаний были выполнены те же измерения за исключением буксировочной силы, так как в этом режиме между буксировочной тележкой и объектом испытаний отсутствует какое-либо соединение и модели двигаются самостоятельно.

Результаты (Results)

Буксировка на прямом курсе. Модельные испытания буксировки балкера ледоколом вплотную были выполнены при движении передним ходом в моделированном ровном сплошном льду толщиной 2,1 м, 1,5 м, 1,0 м и 0,5 м в пересчете на натурные условия для двух осадок балкера: проектной, равной 15,0 м, и балластной, составляющей 13,0 м. На рис. 3 показан один из моментов экспериментальных исследований, демонстрирующий взаимодействие корпусов ледокола и балкера, а также движительно-рулевого комплекса ледокола со льдом при наблюдении в различных ракурсах.

а)



б)

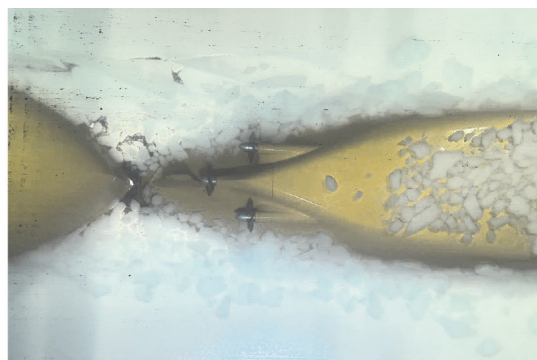
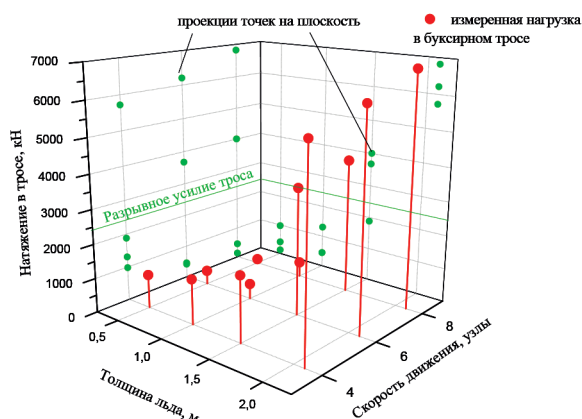


Рис. 3. Фрагмент экспериментальных исследований буксировки вплотную в ровном льду при наблюдении из камеры ледового бассейна (а) и через подводные иллюминаторы (б)

Проведенные эксперименты включали измерение ледового сопротивления ледокола и буксируемого балкера, натяжения в буксирном канате, а также углов крена и дифферента ледокола. На рис. 4 приведены результаты измерений натяжения в буксирном тросе и ледового сопротивления ледокола, осуществляющего буксировку судна вплотную, пересчитанные на натурные условия.

По результатам исследований отмечена классическая ломка сплошного ровного льда секторами корпусом ледокола пр. 22220. Ширина ледового канала, образующегося за корпусом ледокола, составляет примерно 38 м и имеет неровную кромку. При этом следует отметить, что средняя ширина канала зависит от скорости движения ледокола и уменьшается до 36 м с увеличением скорости движения. Балкер, движение которого осуществляется за счет буксировки вплотную, взаимодействует с кромками образующегося ледового канала. В районе перехода носового заострения в цилиндрическую вставку отмечается разрушение льда дроблением за счет его локального смятия. Ширина канала за корпусом балкера в точности соответствует ширине его корпуса, что свидетельствует о возникновении достаточно большой силы сопротивления движению судна.

а)



б)

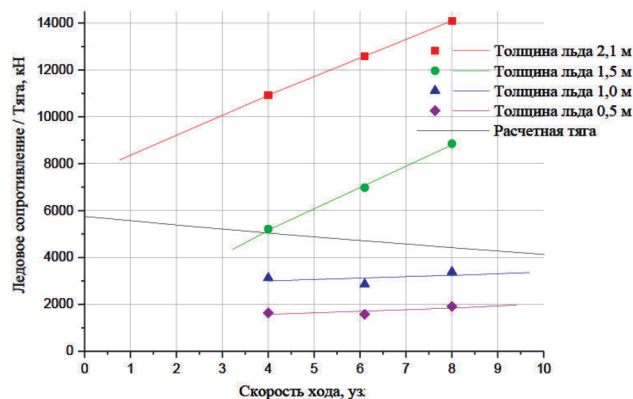


Рис. 4. Результаты измерений натяжения в буксирном тросе при прямолинейном движении (а) и ледового сопротивления ледокола, осуществляющего буксировку балкера (б)

Подводная часть корпуса ледокола покрыта обломками разрушенного льда, часть из которых интенсивно взаимодействует с его гребными винтами. Попадая на гребные винты, обломки льда фрезеруются и струями воды отбрасываются за корму ледокола. Поскольку форштевень балкера плотно прилегает к кормовому кранцу ледокола, его корпус испытывает на себе значительные ударные нагрузки от обломков льда. На ледовое сопротивление сцепки удары отдельных обломков льда не оказывают значительного влияния, однако необходимо учитывать, что прочность корпуса должна быть достаточной для того, чтобы не получить повреждений.

Буксировка балкера вплотную ледоколом на циркуляции. Для исследования особенностей выполнения циркуляции счала ледокол – балкер была использована дополнительная каретка буксировочной тележки ледового бассейна, особенность которой заключается в возможности двигаться в направлении, перпендикулярном продольной оси бассейна. Таким образом, при одновременном движении буксировочной тележки и дополнительной каретки по заданному закону можно выполнить моделирование движения счала по криволинейной траектории. В ходе модельных испытаний выполнялись те же самые измерения, что и при прямолинейном движении моделей. Моделировалось изменение курса ледокола на 15, 10 и 5 град. в сплошном ровном льду (рис. 5).



Рис. 5. Циркуляция сцепки во льдах толщиной 1 м со скоростью 4 уз в пересчете на натурные условия

Модельные испытания буксировки балкера ледоколом вплотную на циркуляции были выполнены при движении передним ходом в моделируемом ровном сплошном льду толщи-

ной 1,5 м и 1,0 м при пересчете на натурные условия. Результатом проведенных исследований буксировки балкера ледоколом вплотную служат измерения ледового сопротивления счала и нагрузки, возникающей в буксирном канате (рис. 5). При движении во льду толщиной 1,5 м была выбрана пологая траектория движения, при которой балкер испытывает наименьшие нагрузки на цилиндрическую вставку во время циркуляции, радиус которой составил чуть более 4 км. При движении во льду толщиной 1,0 м была выбрана более крутая траектория, радиус циркуляции счала составил порядка 2 км. Движение судов рассматривалось на скорости 4–6 уз, но во всех случаях нагрузка в буксирном тросе оказалась выше разрывной в 10–15 раз, что при интерпретации буксировочных испытаний свидетельствует о полном заклинивании балкера в канале. При этом зависимость от скорости и толщины льда в полученных данных не прослеживается, что обусловлено стохастичностью процессов, происходящих в этом случае (в частности, на результат исследований оказывают влияние форма кромки ледового канала и характер заклинивания в нем проводимого судна).

Моделирование остановки ледокола при буксировке балкера вплотную. При выполнении проводки судов возможны ситуации, в которых ледокол вынужден совершить остановку. Причиной этого может стать мощное ледяное образование, попадание в зону ледовых сжатий или иное препятствие по курсу движения судов. Принимая во внимание существенную разницу в водоизмещении ледокола и буксируемого им вплотную судна, является важным изучение нагрузки на корму ледокола и носовую оконечность балкера при необходимости снижения скорости движения или полной остановки.

В ходе экспериментов моделировалась остановка ледокола, осуществляющего буксировку балкера на скорости 8,0 уз с разной степенью интенсивности. В одном случае замедление происходило в течение 180 с натурального времени, в другом — 90 с. При этом фиксировалась нагрузка от навала балкера на корму ледокола. Разгон моделей осуществлялся буксировочной тележкой, а остановка происходила в самоходном режиме с выключенными гребными винтами. Проведенные эксперименты включали измерение ледовой нагрузки на кормовую выемку ледокола, а также крена и дифферента ледокола. Результаты измерений нагрузки приведены на рис. 6.

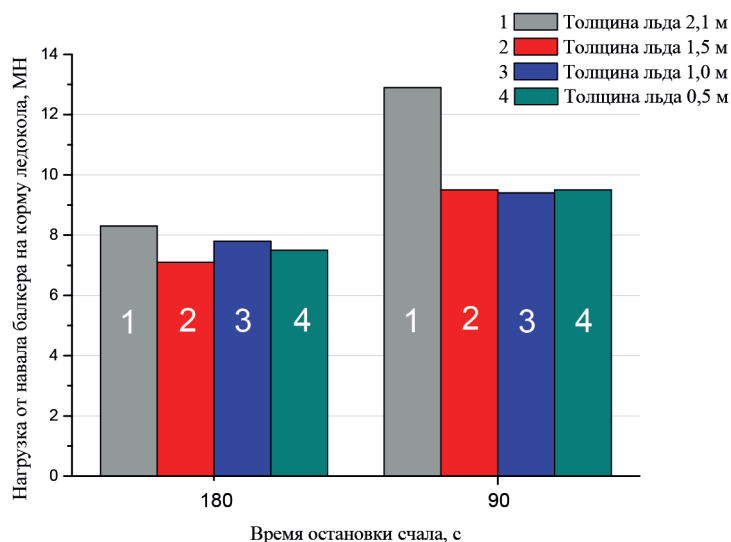


Рис. 6. Распределение нагрузки от навала балкера на корму ледокола при скорости движения до начала остановки 8,0 уз

Полученные результаты демонстрируют влияние времени остановки на уровень возникающей при этом нагрузки на носовую оконечность балкера и, следовательно, кормовую оконечность ледокола. При сокращении времени остановки в два раза нагрузка на корму увеличивается примерно на 20 %. При этом зависимость нагрузки от толщины льда практически не прослеживается.

Обсуждение (Discussion)

В работе представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия ледокола и крупнотоннажного судна при выполнении операции буксировка вплотную. Были изучены три характерных режима движения сцепки: прямой курс, циркуляция и внезапная остановка ледокола. Рассмотрим полученные результаты более подробно.

Движение прямым курсом. Данные, приведенные на рис. 5 и 6, показывают, что если в качестве критерия выполнимости операции буксировки принять прочность буксирного каната на разрыв, то для изученного типа судов формально возможна их буксировка во льдах, толщина которых не превышает 1 м. Однако при этом не учитывается ряд существенных факторов, которые могут оказывать большое влияние на возможность выполнения такой буксировки. К этим факторам относятся следующие.

1. Очертания носовой оконечности большинства крупнотоннажных судов не позволяют плотно закрепить ее в кормовом вырезе ледокола. Это приводит к тому, что даже при незначительных отклонениях ледокола от курса возможны выход форштевня судна из кормовой выемки, разрыв буксирного каната, повреждения кормовой оконечности ледокола, а также форштевня и борта судна.

2. Разница в уровне палуб ледокола и судна приводит к наличию перелома буксирного каната в клюзах, а также к возникновению значительного угла между ним и горизонталью. Это ведет к опасности разрыва каната и изменению посадки ледокола (дифферент на нос) при движении. Изменение дифферента ледокола особенно отчетливо проявляется в момент страгивания. Даже на чистой воде этот процесс имеет ярко выраженный динамический характер, приводящий к возникновению колебательного движения ледокола относительно судна.

3. Движение по извилистой траектории практически невозможно, так как возникающие при этом инерционные силы могут приводить к разрыву буксирного каната.

Совершенно очевидно, что увеличение ширины проводимого судна более ширины проложенного ледоколом канала приведет к существенному снижению толщины ледяного покрова, в которой эта операция осуществима. Резкое снижение толщины льда обусловлено весьма значительным сопротивлением корпуса судна при постоянном разрушении кромок канала [12].

Еще одним фактором, снижающим эффективность буксировки вплотную крупнотоннажных судов, может являться эффект нарушения симметрии при движении крупнотоннажного судна по «узкому» каналу [13], [14], в соответствии которым крупнотоннажное судно при движении по узкому каналу самопроизвольно занимает в нем несимметричное положение относительно оси канала. Такую тенденцию можно объяснить особенностями взаимодействия корпуса судна с кромками канала. Если же она сохраняется и в процессе буксировки судна вплотную, то возможно возникновение дополнительных усилий и моментов, способствующих выходу носа судна из кормового выреза ледокола, однако этот вопрос требует дополнительного изучения.

Движение на циркуляции и остановка ледокола. Полученные для этих режимов результаты показывают, что для рассмотренного транспортного судна велика вероятность разрыва буксирного троса. Необходимо отметить еще один фактор, существенным образом снижающий эффективность буксировки вплотную крупнотоннажных судов, — отрицательное воздействие струй воды, отбрасываемых гребными винтами ледокола. Из-за того, что осадка проводимого судна заметно превышает осадку ледокола, струи от движителей ударяются в «плоскую» стенку, приводя к возникновению существенного натяжения в буксирном тросе.

Несмотря на то, что приведенные в данной работе результаты исследований позволяют сделать вывод о невозможности осуществления буксировки вплотную крупнотоннажных судов, представляется целесообразным сформулировать следующие рекомендации, которые могли бы изменить ситуацию в положительную сторону:

1. Применять буксировку вплотную только для судов, имеющих ширину, не превышающую ширину проложенного ледоколом канала, а также водоизмещение, которое не более чем в 2 раза превышает водоизмещение ледокола. (Последняя рекомендация носит ориентировочный характер, так как не имеет пока серьезных экспериментальных и теоретических подтверждений).

2. Носовая оконечность буксируемого судна должна плотно входить в кормовой вырез ледокола. Желательно применить технические решения, которые смогут уменьшить угол наклона буксирного троса, возникающий из-за разницы в уровне палуб ледокола и судна.

3. Буксировку вплотную крупнотоннажных судов следует осуществлять во льдах толщиной не более 1 м, причем использовать этот прием следует лишь в крайнем случае и на коротких дистанциях. Буксировку следует осуществлять на прямом курсе, избегая по возможности изменения его направления. В случае, если изменение курса неизбежно, то его следует осуществлять по максимально пологой траектории.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе выполнено экспериментальное исследование возможности проводки крупнотоннажных судов ледоколами методом буксировки вплотную. Исследовалось взаимодействие современного атомного ледокола типа «Арктика» с некоторым условным балкером, водоизмещение которого примерно в 3 раза превышало водоизмещение ледокола.

2. Буксировка вплотную крупнотоннажных судов ледоколами во льдах, толщина которых превышает 1 м, практически невыполнима. Данный вывод получен на основании сравнения усилий в буксирном тросе, которые были измерены при проведении модельных испытаний в ледовом бассейне, с величиной разрывного усилия троса. Следует особо отметить, что указанная ранее граничная толщина ледяного покрова относится только к условиям буксировки в сплошных ровных льдах прямым курсом. Наличие различных неоднородностей ледяного покрова (торосов, наслоений, сжатого тертого и битого льда) приводят к снижению указанного значения. К сожалению, ограниченный объем выполненных экспериментальных исследований не позволяет более точно установить границу по толщине льда для различных неравномерностей сплошного льда.

3. Маневры, связанные с изменением направления движения, а также резкими изменениями скоростного режима также существенно снижают границу, в пределах которой по критерию прочности буксирного троса возможна буксировка.

4. Буксировка вплотную крупнотоннажных судов представляет существенные трудности и во многих случаях невыполнима. К этому приему можно прибегать только в экстренных случаях в относительно тонких льдах. Вопросы изучения буксировки вплотную, при выборе данной операции в качестве основной для эксплуатации транспортного судна в зимний период, следует изучать наравне с ледокольными качествами судна на стадии его проектирования путем физического моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kondratenko A. A. A Holistic Multi-Objective Design Optimization Approach for Arctic Offshore Supply Vessels / A. A. Kondratenko, M. Bergström, A. Reutskii, P. Kujala // Sustainability. — 2021. — Vol. 13. — Is. 10. — Pp. 5550. DOI: 10.3390/su13105550.
2. Topaj A. G. Optimal ice routing of a ship with icebreaker assistance / A. G. Topaj, O. V. Tarovik, A. A. Bakharev, A. A. Kondratenko // Applied Ocean Research. — 2019. — Vol. 86. — Pp. 177–187. DOI: 10.1016/j.apor.2019.02.021.
3. Куликов Н. В. Буксировка судов во льдах / Н. В. Куликов, К. Е. Сазонов. — СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2003. — 158 с.
4. Кулеш В. А. Эксплуатация судов в полярных водах: Учебное пособие / В. А. Кулеш, А. А. Лентарёв, Г. Н. Шарлай, В. Н. Мотрич, С. Ю. Монинец; под ред. А. А. Лентарёва. — СПб.: Моркнига, 2018. — 277 с.
5. Myland D. Investigation on semi-empirical coefficients and exponents of a resistance prediction method for ships sailing ahead in level ice / D. Myland, S. Ehlers // Ships and Offshore Structures. — 2019. — Vol. 14. — Is. suppl. — Pp. 161–170. DOI: 10.1080/17445302.2018.1564535.

6. Myland D. Model scale investigation of aspects influencing the ice resistance of ships sailing ahead in level ice / D. Myland, S. Ehlers // *Ship Technology Research*. — 2020. — Vol. 67. — Is. 1. — Pp. 26–36. DOI: 10.1080/09377255.2019.1576390.
7. Luo W. Numerical simulation of an ice-strengthened bulk carrier in brash ice channel / W. Luo, D. Jiang, T. Wu, C. Guo, C. Wang, R. Deng, S. Dai // *Ocean Engineering*. — 2020. — Vol. 196. — Pp. 106830. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106830.
8. Close-coupled towing in model scale // *Arctic Passion News*. — Aker Arctic Technology Inc's customer magazine, 2022. — Vol. 1. — Is. 23. — 20 p.
9. Безопасность плавания во льдах / под редакцией А. П. Смирнова. — М.: Транспорт, 1993. — 325 с.
10. Казарезов А. Я. Кранцевая защита / А. Я. Казарезов, В. Э. Магула. — Л.: Судостроение, 1992. — 160 с.
11. ITTC Quality System Manual. Recommended Procedures and Guidelines. Resistance tests in ice. — ITTC 2017. — 8 p.
12. Сазонов К. Е. Ледовая ходкость крупнотоннажных судов / К. Е. Сазонов, А. А. Добродеев. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2017. — 122 с.
13. Li F. Ship performance in ice channels narrower than ship beam: Model test and numerical investigation / F. Li, M. Suominen, P. Kujala // *Ocean Engineering*. — 2021. — Vol. 240. — Pp. 109922. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109922.
14. Dobrodeev A. A. Large ship motion mechanics in “narrow” ice channel / A. A. Dobrodeev, N. Y. Klementyeva, K. E. Sazonov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 193. — Is. 1. — Pp. 012017. DOI: 10.1088/1755-1315/193/1/012017.

REFERENCES

1. Kondratenko, Aleksander A., Martin Bergström, Aleksander Reutskii, and Pentti Kujala. “A holistic multi-objective design optimization approach for arctic offshore supply vessels.” *Sustainability* 13.10 (2021): 5550. DOI: 10.3390/su13105550.
2. Topaj, A. G., O. V. Tarovik, A. A. Bakharev, and A. A. Kondratenko. “Optimal ice routing of a ship with icebreaker assistance.” *Applied Ocean Research* 86 (2019): 177–187. DOI: 10.1016/j.apor.2019.02.021.
3. Kulikov, N. V., and K. E. Sazonov. *Buksirovka sudov vo l'dah*. SPb.: CNII im. akad. A. N. Krylova, 2003.
4. Kulesh, V. A., A. A. Lentarev, G. N. Sharlai, V. N. Motrich, and S. Yu. Moninets. *Ekspluatatsiya sudov v polyarnykh vodakh*. Edited by A. A. Lentarev. SPb.: MORKNIGA, 2018.
5. Myland, Daniela, and Sören Ehlers. “Investigation on semi-empirical coefficients and exponents of a resistance prediction method for ships sailing ahead in level ice.” *Ships and Offshore Structures* 14.sup1 (2019): 161–170. DOI: 10.1080/17445302.2018.1564535.
6. Myland, Daniela, and Sören Ehlers. “Model scale investigation of aspects influencing the ice resistance of ships sailing ahead in level ice.” *Ship Technology Research* 67.1 (2020): 26–36. DOI: 10.1080/09377255.2019.1576390.
7. Luo, Wanzhen, Dapeng Jiang, Tiecheng Wu, Chunyu Guo, Chao Wang, Rui Deng, and Saishuai Dai. “Numerical simulation of an ice-strengthened bulk carrier in brash ice channel.” *Ocean Engineering* 196 (2020): 106830. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106830.
8. “Close-coupled towing in model scale.” *Arctic Passion News*. Aker Arctic Technology Inc's customer magazine 2022. Vol. 1. Is. 23.
9. Smirnov, A. P., ed. *Bezopasnost' plavaniya vo l'dah*. M.: Transport, 1993.
10. Kazarevov, A. Ya., and V. E. Magula. *Krancevaya zashchita*. L.: Sudostroenie, 1992.
11. *ITTC Quality System Manual. Recommended Procedures and Guidelines. Resistance tests in ice*. ITTC 2017.
12. Sazonov, K. E., and A. A. Dobrodeev. *Ledovaya hodkost' krupnotonnazhnykh sudov*. SPb.: FGUP «Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy centr», 2017.
13. Li, Fang, Mikko Suominen, and Pentti Kujala. “Ship performance in ice channels narrower than ship beam: Model test and numerical investigation.” *Ocean Engineering* 240 (2021): 109922. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109922.
14. Dobrodeev, A. A., N. Yu Klementyeva, and K. E. Sazonov. “Large ship motion mechanics in “narrow” ice channel.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 193. No. 1. IOP Publishing, 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/193/1/012017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Добродеев Алексей Алексеевич —
кандидат технических наук
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»
196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Московское шоссе, д. 44
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
Государственный морской технический
университет»
190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Лоцманская ул., д. 3
e-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru, stamukha@yandex.ru
Сазонов Кирилл Евгеньевич —
доктор технических наук
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»
196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Московское шоссе, д. 44
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
Государственный морской технический
университет»
190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Лоцманская ул., д. 3
e-mail: K_Sazonov@ksrc.ru, kirsaz@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dobrodeev, Aleksei A. —
PhD
Krylov State Research Centre
44 Moscow highway,
St. Petersburg, 196158,
Russian Federation
St. Petersburg State Marine
Technical University
3 Lotsmanskaya Str.,
St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru, stamukha@yandex.ru
Sazonov, Kirill E. —
Dr. of Technical Sciences
Krylov State Research Centre
44 Moscow highway,
St. Petersburg, 196158,
Russian Federation
St. Petersburg State Marine
Technical University
3 Lotsmanskaya Str.,
St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: K_Sazonov@ksrc.ru, kirsaz@rambler.ru

*Статья поступила в редакцию 29 июля 2022 г.
Received: July 29, 2022.*