

ЛЕДОТЕХНИКА ICE TECHNOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-91-105>
УДК 551.326.7



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Особенности выбора сценариев ледовых условий для модельных исследований в обеспечении промышленного освоения Обской губы

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

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

² — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

*kirsaz@rambler.ru

Резюме

Обская губа уже давно стала основным центром развития российской нефтяной промышленности в Арктическом регионе. Стремительный рост судоходства и активное создание портовой инфраструктуры в этой акватории являются неотъемлемой частью стратегии по развитию Российской Арктики. В статье описаны исследования, выполненные в ледовом бассейне Крыловского государственного научного центра в течение последних двадцати лет в обеспечение проектирования и эксплуатации различных технических объектов, предназначенных для промышленного освоения Обской губы. В выполненных работах можно выделить два основных направления исследований — это взаимодействие судов и инженерных сооружений с ледяными образованиями, характерными для Обской губы. В работе подчеркивается существенная зависимость возможности проведения в ледовом бассейне экспериментов и их адекватного анализа от качества исходных данных, в первую очередь по гидрологии и ледовым характеристикам внешней среды.

Ключевые слова: дрейф, ледовый бассейн, ледяной покров, Обская губа, торос, физическое моделирование.

Для цитирования: Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Особенности выбора сценариев ледовых условий для модельных исследований в обеспечении промышленного освоения Обской губы // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 1. С. 91–105. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-91-105>.

Поступила 15.02.2023

После переработки 12.03.2023

Принята 13.03.2023

The choice of ice conditions for ice model tests to support the industrial development of the Ob' Bay

Aleksei A. Dobrodeev^{1,2}, 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 Ob' Bay has long been the main center for the development of the Russian oil industry in the Arctic region. The rapid growth of shipping and the active creation of port infrastructure in this area are an integral part of the strategy for the development of the Russian Arctic. The main feature of the hydrometeorological regime of the Ob' Bay is the annual presence of ice for a long time. Determining the ice performance of icebreakers, tugboats and heavy-tonnage vessels designed for the region, as well as ice loads on marine platforms and hydraulic structures, is a most important task in the creation thereof.

The paper describes research carried out in the ice model tank of the Krylov State Research Centre over the past twenty years. The research supports the design and operation of new technical facilities intended for the industrial development of the Ob' Bay. In the completed study, two main areas of research can be distinguished, namely the interaction of ships and engineering structures with ice formations in the Ob' Bay. The paper emphasizes a significant dependence of the possibility of conducting ice tests and proper analysis of findings on the quality of the initial data, primarily hydrology and ice parameters.

The results of ice model tests analysis, especially the ice impact on offshore and hydraulic structures for the Ob' Bay, show the need to change approaches to determining theoretical ice loads and, as a result, to expand ice model testing programs. The simulation of the worst-case scenario, when all ice parameters are determined for a given probability and are not consistent with each other, leads to a significant overestimation of ice loads and the physical modeling of unrealistic combinations of ice conditions.

Each ice impact scenario should contain the maximum value of only one main ice parameter corresponding to the probability. The main ice parameters include the thickness, the flexural strength or compression strength and the speed of ice drift. In this case, ice parameters should be selected in accordance with the chosen main one in the modeling scenario. It should not be the result of the same maximum value calculation for the given observation period as for the main ice parameter.

Keywords: ice model tank, ice moving, ice sheet, physical modelling, ridge, the Ob' Bay.

For Citation: *Dobrodeev A.A., Sazonov K.E.* The choice of ice conditions for ice model tests to support the industrial development of the Ob' Bay. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2023, 69 (1): 19–105. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-91-105>.

Received 15.02.2023

Revised 12.03.2023

Accepted 13.03.2023

ВВЕДЕНИЕ

С начала XXI в. происходит планомерное промышленное освоение полярных регионов России. В наибольшей степени это касается Обской губы, берега и дно которой содержат большое количество месторождений углеводородов. Именно в Обской губе были реализованы такие крупные проекты, как строительство порта в поселке Сабетта, «Ворота Арктики», в настоящее время проводятся работы в рамках проектов «Арктик СПГ2» (терминал «Утренний»), «Каменомысское-море» и др.

Большинство из указанных проектов освоения ориентированы на вывоз добываемого углеводородного сырья морским транспортом. Это обстоятельство опреде-

лило основные направления исследований, осуществляемых с помощью проведения модельного эксперимента в ледовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (КГНЦ). Основные работы лаборатории были направлены на изучение особенностей взаимодействия современных крупнотоннажных судов со льдом в специфических условиях Обской губы. Другим направлением работ было определение ледовой нагрузки на различные варианты гидротехнических портовых сооружений. Изучались также вопросы определения ледовой нагрузки на пришвартованные суда.

Многие из этих работ были выполнены благодаря постройке в 2014 г. нового ледового бассейна взамен старого [1]. По своим характеристикам он существенно отличается от предыдущей лаборатории. На рис. 1 видны существенные различия в размерах чаши опытовых бассейнов. Длина моделируемого ледяного поля возросла с 35 до 80 м, а ширина — с 6 до 10 м. В дне бассейна появились обзорные иллю-



Рис. 1. Ледовые опытовые бассейны КГНЦ. Слева — ледовый бассейн, построенный в 1980 г.; справа — ледовый бассейн, построенный в 2014 г.

Fig. 1. Ice tanks of Krylov State Research Centre. On the left — ice tank built in 1980; on the right — ice tank built in 2014.

минаторы. Диапазон скоростей тележки вырос более чем в два раза и составляет от 1 мм/с до 1,5 м/с. Эти изменения стали толчком для проведения большого количества новых работ по изучению воздействия льда на гидротехнические сооружения, а также ходовых и маневренных качеств крупнотоннажных судов.

Основной спецификой экспериментальных исследований морских объектов для Обской губы, полноценное выполнение которых стало возможным благодаря вводу в эксплуатацию уникального нового ледового бассейна, являются размеры сооружений и сложные характеристики ледовых условий. К примеру, для вывоза из этой акватории сжиженного природного газа был построен крупнейший арктический танкер класса ЯмалМакс. Для такого типа судов впервые в мире осуществлялось моделирование движения под проводкой ледоколов в морском канале, маневрирования в условиях сжатий, работы на мелководе. Другими типами исследуемых сооружений являются морские причалы, ледозащитные сооружения, подходные дамбы, основания гравитационного типа, и они также обладают внушительными размерами. Моделирование воздействия на них льда с соблюдением всех основных критериев подобия потребовало создания новых методик и технологий проведения экспериментов, не существовавших ранее и возможных к применению только в современной лаборатории. Особую роль в моделировании играет воспроизведение реальных ледовых условий. Впервые в работах по Обской губе большое внимание было уделено происхождению и влиянию на судоходство тертого льда, образующегося в акваториях портов и ледяных каналах [2]. Новые технологии моделирования тертого льда в ледовых бассейнах создали предпосылки к проектированию абсолютно новых типов ледокольных судов [3].

В данной статье особый акцент сделан именно на моделировании ледовых условий, в частности, обозначена проблема выбора расчетных сценариев ледового воздействия на проектируемые объекты морской техники. На основании обзора работ, выполненных в ледовом бассейне КГНЦ, показана эффективность применения метода физического моделирования для решения конкретных проектных задач, связанных с освоением Обской губы. Целью анализа выполненных работ по физическому моделированию, особенно взаимодействия льда с морскими и гидротехническими сооружениями для Обской губы, стало обоснование необходимости изменения подходов к выбору расчетных характеристик льда и, как следствие, расширения программ экспериментальных исследований. Опыт проведения модельных испытаний показывает, что выбор и моделирование наихудшего сценария в качестве расчетного, когда все характеристики льда определены независимо друг от друга для заданной ежегодной вероятности их превышения в соответствии с классом сооружения, приводят к существенному завышению уровня ледовых нагрузок и воспроизведению малореалистичных комбинаций ледовых условий.

ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЬДА НА СУДА

Модельные исследования ледовой ходкости судов в обеспечение их проектирования базируются на воссоздании в ледовом бассейне некоторых, так называемых эталонных ледовых условий, которые характерны практически для любых полярных и замерзающих морей [4]. Поэтому, как правило, учет специфических особенностей того или иного полярного региона при проектировании ледоколов и судов ледового плавания не проводится. Сказанное выше в полной мере относится и к проектированию современных крупнотоннажных судов ледового плавания, предназначенных для перевозки СПГ или нефти [5].

Тем не менее в некоторых случаях учет специфических особенностей региона оказывается важным не только для проектирования судов, но и для обеспечения их эффективной эксплуатации. Ниже приводятся два соответствующих примера.

Моделирование работы судов в условиях порта Сабетта

В ледовом бассейне КГНЦ выполнялись работы по исследованию ледовой ходкости двух буксиров, которые проектировались для работы в порту Сабетта. При отрицательных температурах воздуха на акватории порта из-за постоянного движения судов образуется толстый слой тертого льда, который оказывает негативное влияние на возможность выполнения различных технологических операций. Кроме этого, тертый лед образуется в подходных к порту каналах, также препятствуя движению судов. Этой проблеме посвящено довольно большое количество публикаций [6–9]. Краткий обзор физических свойств тертого льда содержится в работе [2], а особенности взаимодействия судов с этим ледяным образованием описаны в работе [3].

При проведении модельных испытаний пристальное внимание было уделено исследованию движения буксиров в тертом льду, для создания которого в ледовом бассейне КГНЦ была создана специальная установка [4]. Особый интерес представляло изучение возможности движения буксира в слое тертого льда, толщина которого превышала 2,0 м. Такие ледовые условия характерны для портов и ледяных каналов Обской губы. Испытания проводились при движении модели как передним, так и задним ходом. На рис. 2 приведены надводные и подводные фотографии, полученные при буксировке самоходной модели по каналу, забитому тертым льдом.

Результаты испытаний убедительно показали, что в указанных тяжелых условиях проектируемые буксиры могут успешно выполнять свои функции. Достижимая скорость таких судов составляет чуть более 5,0 узлов в тертом льду толщиной 2,5 м. Последующая эксплуатация буксиров в порту полностью подтвердила полученные выводы.

Среди вопросов, связанных с движением судов в портовых акваториях, стоит отметить исследования по изучению взаимодействия пришвартованного к причалу судна с движущимся мимо него другим судном, когда между ними находится слой тертого льда. В результате этих исследований было показано, что если расстояния между корпусами больше примерно удвоенной ширины движущегося судна, то существенных воздействий на пришвартованное судно не наблюдается. Эти выводы легли в основу выбора расстояния от разворотного круга и подходных каналов до причалов порта Сабетта.



Рис. 2. Испытания модели буксира для порта Сабетта в канале с тертым льдом: *a* — вид сверху; *б* — взаимодействие подводной поверхности буксира с тертым льдом

Fig. 2. Ice model tests of a tug for the port of Sabetta in brash ice channel: *a* — top view; *b* — interaction between hull and brash ice

Моделирование эксплуатации судов в Морском канале Обской губы

Другим примером применения метода модельного эксперимента к изучению влияния специфических условий Обской губы является изучение движения крупнотоннажного судна в условиях дрейфа льда. Рассматриваемая ситуация соответствует условиям прохождения таким судном Морского канала. Транспортные системы, обеспечивающие вывоз углеводородного сырья из Обской губы, в настоящее время испытывают некоторые затруднения в зимний период при обеспечении движения крупнотоннажных судов по Морскому каналу. Эти затруднения связаны с дрейфом льда, который приводит к изменению курса судна, что в условиях открытого моря не представляет никакой опасности. При движении же судна по каналу, ширина которого ограничена, дрейф льда может стать причиной посадки судна на мель.

В зимнее время движение крупнотоннажных судов, как правило, осуществляется под проводкой ледоколов, при этом они осуществляют движение по проложенному каналу, взаимодействуя с его кромками. В морской практике хорошо известно, что изменение курса, вызванное дрейфом судна, можно компенсировать, двигаясь с соответствующим углом дрейфа. В модельном эксперименте, выполненном в ледовом бассейне КГНЦ, изучалось ледовое сопротивление крупнотоннажного судна (на примере газозова класса ЯмалМакс) при его движении по ледяному узкому каналу с упреждением на дрейф.

В процессе проведения экспериментальных исследований моделировались поля дрейфующего под углом 90 градусов льда к направлению движения судна. Эти поля представляли собой сплошной ровный и крупнобитый сплоченный лед, в котором моделью ледокола был проложен канал. Такая методика приготовления ледяного канала соответствует рекомендациям Ледового комитета Международной конференции опытовых бассейнов [10]. Также в качестве исходных данных принято, что судно движется не только в условиях дрейфующего льда, но и под воздействием сжатий. Ширина канала за ледоколом в этом случае постепенно уменьшается. Как результат, моделируется движение судна в ледяном канале, ширина которого меньше, чем ширина канала, проложенного ледоколом.

Закрытие ледяного канала характеризуется скоростью смыкания кромок. Эта скорость связана с балльностью сжатия зависимостью, которую экспериментально получил А.Т. Казаков [11] и которая может быть в первом приближении аппроксимирована выражением [12]:

$$V_p = 0,005s + 0,03782s^2, \text{ м/с},$$

где V_p — скорость смыкания кромок канала; s — балльность сжатия.

В ходе эксперимента моделировался как дрейф льда, так и закрытие канала. Скорость закрытия канала была выбрана 0,05 м/с. В среднем безопасная дистанция между ледоколом и судном составляет от 1 (при сплоченности 6–8 баллов) до 2,5 кбт. Основываясь на этих данных, в экспериментах было принято, что ширина канала, по которому движется крупнотоннажное судно, составляет 24 м. Эксперименты проводились для двух толщин льда равных 1,5 и 2,0 м. На рис. 3 приведены фотографии, полученные при буксировке самоходной модели по каналу с углом дрейфа.

Результаты обработки полученных экспериментальных данных представлены на рис. 4. Их анализ показывает, что движение с углом дрейфа в условиях дрейфу-

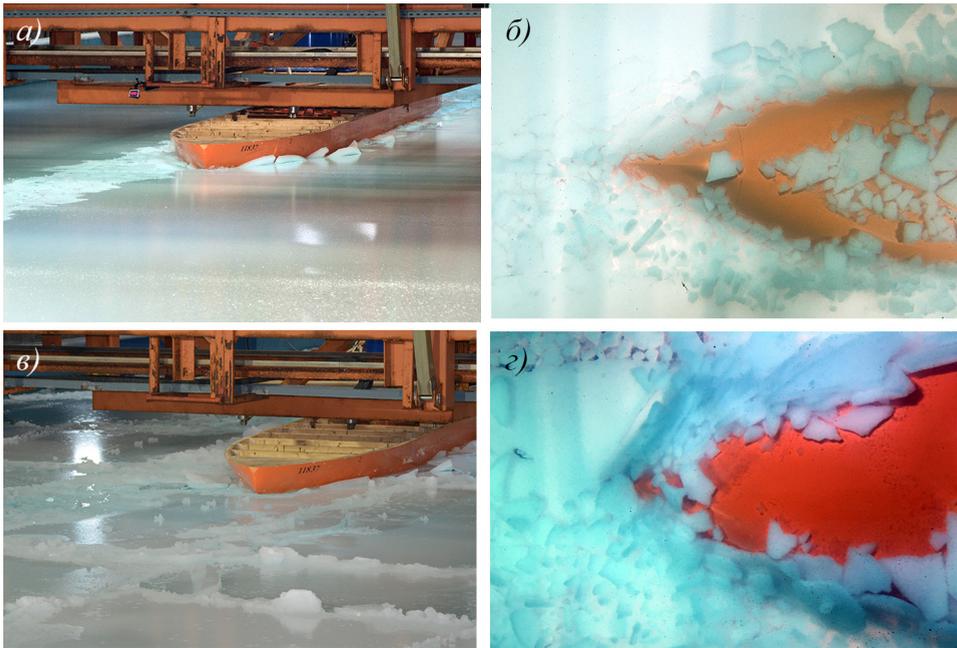


Рис. 3. Испытания модели крупнотоннажного судна, движущегося в канале углом дрейфа 3°. Верхний ряд — взаимодействие со сплошным льдом, нижний ряд — со сплоченным крупнобитым льдом. а, в — вид сверху; б, г — вид из-под воды

Fig. 3. Ice model tests of large-size vessel moving in a channel with a drift angle of 3 degrees. The upper row — moving in level ice, the lower row — moving in compressed ice floes. а, в — top view; б, г — view from bottom windows

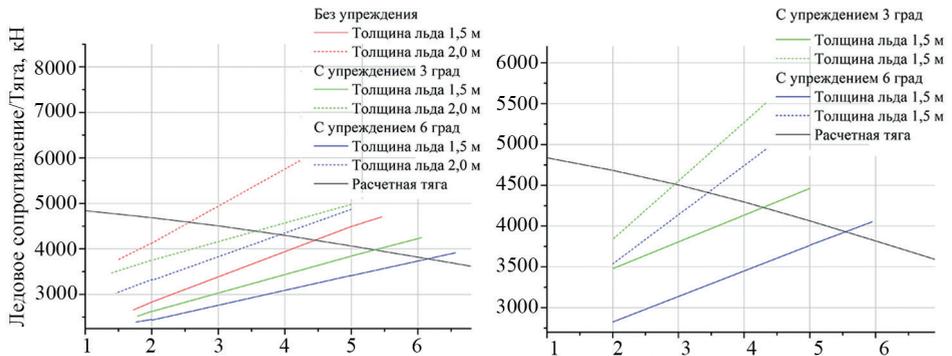


Рис. 4. Ледовое сопротивление крупнотоннажного судна, движущегося по каналу с углом дрейфа 3°: а — канал в ровном льду; б — канал в сплоченном крупнобитом льду

Fig. 4. Ice resistance of large-size vessel moving in a channel with a drift angle of 3 degrees: а — channel in level ice; б — channel in compressed ice floes

ющего по каналу льда не только повышает безопасность мореплавания, но и демонстрирует лучшие показатели ледовой ходкости. Математическая модель движения крупнотоннажного судна по каналу в условиях дрейфа льда приведена в работе [13].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ ОБСКОЙ ГУБЫ

Основная масса модельных исследований, выполненных в ледовом бассейне КГНЦ, была посвящена изучению ледовой нагрузки на инженерные сооружения, расположенные в Обской губе. Эти исследования можно разделить на три большие группы.

Моделирование воздействия льда на морские сооружения

К первой группе отнесены исследования взаимодействия отдельно стоящих инженерных сооружений со льдом. Характерным примером таких работ является изучение ледовой нагрузки на гидротехническое сооружение, предназначенное для размещения системы мониторинга гидрометеорологических факторов. Оно призвано обеспечить безопасность мореплавания в границах Морского канала и на подходах к нему. Другим примером является терминал для отгрузки нефти в районе мыса Каменный. Указанные объекты в районе взаимодействия со льдом имеют форму усеченного конуса с вершиной, направленной вверх. Довольно важным результатом этих исследований стало измерение опрокидывающего момента от воздействия сплошного ровного льда, позволившее внести уточнения в расчеты устойчивости сооружения на грунте. При этом методика проведения подобных исследований является стандартной и подробно описана в литературе [4].

Наибольший объем экспериментов в этой группе был выполнен в обеспечение проектов обустройства месторождения «Каменномысское-море». Это морское месторождение расположено на малой глубине (6,0–15,0 м), которая сочетается с тяжелыми ледовыми условиями (толщина льда — до 2,5–3,0 м) и значительными колебаниями уровня воды [14]. Для добычи на этом месторождении ведется строительство ледостойкой стационарной платформы и проектируются три блок-кондуктора. Программой испытаний было предусмотрено изучение воздействия сплошного ледяного покрова, крупнобитого льда, а также торосистых образований.

На рис. 5 представлены фотографии, демонстрирующие некоторые моменты выполненных экспериментов. В ходе модельных испытаний помимо измерения ледовых сил и моментов особое внимание уделялось наблюдениям за образованием ледяных нагромождений перед объектами. Они формируются в условиях мелководья и могут препятствовать безопасному функционированию объекта. Особую опасность

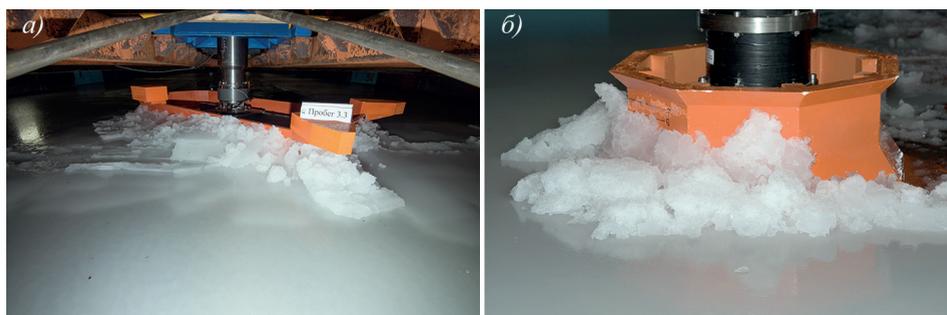


Рис. 5. Модельные исследования взаимодействия ледостойкой платформы с торосистым образованием (а) и блок-кондуктора с ровным льдом (б)

Fig. 5. Ice model tests of an ice-resistant marine structure interacting with an ice ridge (а) and a conductor with level ice (б)

представляет наполнение льда на поверхность сооружений. Результатами исследований стали предложения об оптимизации формы каждого из них, позволившие нивелировать вероятность возникновения таких явлений.

Моделирование воздействия льда на судно при отгрузке возле терминала

Вторая группа исследований была связана с изучением характера взаимодействия со льдом инженерного сооружения и пришвартованного к нему судна. Так, для Новопортовского терминала были выполнены измерения натяжения в швартовном тросе в условиях изменения направления дрейфа льда на 10° . В работе [15] быстрое изменение направления дрейфа льда относится к опасным ледовым явлениям. В специально поставленном опыте измерялись усилия в швартовых в момент изменения судном своего положения из-за смены направления дрейфа. Как показали модельные испытания, максимальные нагрузки на швартовный трос возникли именно в этой ситуации. Характерный пример измерений величины натяжения швартовного троса представлен на рис. 6.

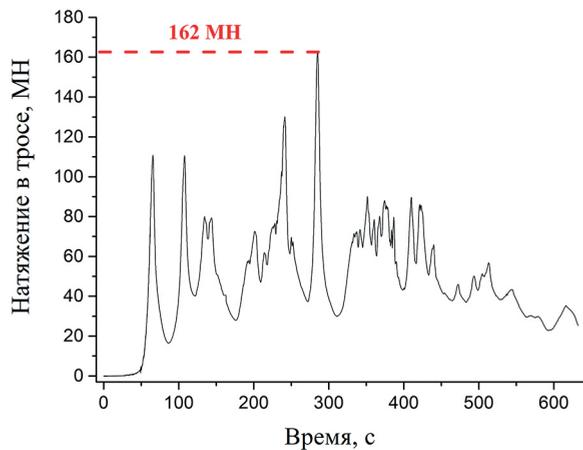


Рис. 6. Взаимодействие «танкер–терминал» со льдом при изменении направления его дрейфа на 10°

Fig. 6. Interaction of oil tanker and oil rig with the ice when the direction of its drift is changed by 10 degrees

Экспериментальные исследования показали, что вследствие воздействия значительной боковой нагрузки на корпус судна со стороны ледяного покрова ему не удастся сразу занять новое положение в канале, остающемся позади терминала. Поэтому носовая часть судна пересекает канал и начинает подламывать кромку ледяного поля. В этот момент нагрузка на швартовный трос начинает значительно возрастать и в определенный момент достигает своего максимального значения. По ходу взаимодействия с ледяным покровом судно скалывает значительные обломки льда в канал терминала и постепенно занимает положение, при котором его диаметральной плоскостью оказывается параллельна направлению дрейфа.

Моделирование воздействия льда на гидротехнические сооружения

Третья группа работ заключалась в исследованиях ледовой нагрузки на различные портовые сооружения. Особенности этих исследований подробно описаны в работах [16, 17]. В них представлены результаты модельных испытаний, относя-

щиеся к изучению воздействия льда на протяженные гидротехнические сооружения с вертикальной стенкой и откосные с наклонной гранью. Подробно представлены новые технологии проведения подобных экспериментов. Выполненные исследования убедительно доказали, что для сооружений с вертикальной гранью и наклонной стенкой большое влияние на уровень ледовой нагрузки оказывают процессы формирования ледяных нагромождений перед сооружениями. Данный вывод стал предпосылкой к разработке теории формирования таких нагромождений, позволяющей создать расчетные схемы для определения ледовой нагрузки и геометрических характеристик нагромождения, а также для оценки вероятности попадания льда в рабочие зоны инженерных сооружений.

НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ОБ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ

Целью физического моделирования в ледовых бассейнах является получение информации о ледовых силах и моментах, действующих на различные технические объекты. Обычно предполагается, что при проведении модельного эксперимента должны моделироваться ледовые условия. Разнообразие различных ледовых условий очень велико, и все они не могут быть воспроизведены в ледовом бассейне. Поэтому при проведении экспериментов моделируют некоторые стандартные «эталонные» ледовые условия, к которым в настоящее время относят сплошной ровный лед (припай), мелко- и крупнобитый лед, ледяные каналы, заполненные тертым льдом, торосистую гряду [4]. Иногда в ледовых бассейнах имитируют ледовые сжатия [4]. Выбор тех или иных эталонных условий осуществляется на основе описания реальных ледовых условий в районе расположения инженерного сооружения. Далее в этом разделе статьи речь пойдет именно о назначении ледовых условий при изучении воздействия льда на инженерные сооружения, т. к. выбор характеристик льда при исследовании ледовой ходкости судов является уже вполне устоявшейся процедурой.

Помимо описания ледовых условий для моделирования необходимо иметь данные о прочностных свойствах льда. Эти свойства, уменьшенные в масштаб модели раз, должны воспроизводиться при моделировании.

Как правило, выбор ледовых условий осуществляется на основе технической документации по результатам инженерно-гидрометеорологических изысканий, предоставляемой проектной организацией. Довольно часто информации о гидрометеорологическом режиме акватории оказывается недостаточно для получения расчетных характеристик ледовых условий. Согласно требованиям нормативного документа СП 47.13330.2016, п. 7.1.14, «Продолжительность наблюдений на акватории морей, когда отсутствуют долговременные наблюдения, должна составлять не менее 3–5 лет (до начала проектирования) в зависимости от сложности гидрометеорологического режима» [18]. Зачастую данные таких наблюдений отсутствуют. При этом в тех случаях, когда период наблюдений приходится ограничивать меньшим сроком, заказчику приходится брать на себя ответственность за возможные последствия использования при проведении метеорологических расчетов результатов эпизодических или кратковременных наблюдений. Все вышесказанное приводит к ситуации, когда для выявления наиболее опасных сценариев воздействия ледяных образований на гидротехнические сооружения закладываются имеющиеся характеристики льда, которые, как правило, являются максимальными за весь период наблюдений и определены с заданной обеспеченностью. Комбинирование таких параметров льда при

выполнении физического моделирования или расчетов ледовой нагрузки ведет к искажению данных о реальной ледовой обстановке.

Проиллюстрируем вышесказанное на примере, который относится к работам, связанным с освоением месторождения «Каменномысское-море» в Обской губе. На основе оценки ледовых условий для данной акватории были сформулированы наиболее опасные сценарии развития ледовой обстановки в районе месторождения [14]:

- 1) взаимодействие с дрейфующими ледяными полями ровного и торосистого льда в осенне-зимний период перед становлением припая;
- 2) взаимодействие с неокрепшим припаем в начале зимнего периода, когда еще возможны его взлом и подвижки;
- 3) взаимодействие с установившимся (неподвижным) припаем в зимний период (в январе–мае);
- 4) взаимодействие с припаем в весенний период перед его взломом;
- 5) взаимодействие с дрейфующими ледяными полями, образующимися в весенне-летний период после взлома припая.

Анализ указанных условий показал, что в «качестве основного сценария, определяющего проектный уровень глобальных ледовых нагрузок, принято взаимодействие платформы с торосистым льдом в осенне-зимний период перед становлением припая» [14, с. 35]. Очевидно, что речь идет о вновь образовавшихся торосах, у которых практически отсутствует консолидированный слой. Также очевидно, что важную роль при определении глобальной ледовой нагрузки на сооружения будут играть данные о геометрических характеристиках торосов и скорости их дрейфа.

Приведем теперь данные о ледовых условиях, на основании которых в ледовом бассейне проводились модельные испытания. Всего на различных стадиях проектирования было выполнено три группы экспериментальных исследований с различными ледовыми условиями. Основные характеристики льда, смоделированные в ходе указанных модельных испытаний, приведены в таблице.

Таблица

Варианты ледовых условий для месторождения «Каменномысское-море»

Table

Ice conditions options for the Kamennomysskoye-more gas field

Наименование характеристики	Вариант задания		
	1	2	3
Толщина ровного льда, м	1,670 и 2,350	2,56	–
Прочность ровного льда на изгиб, кПа	780	700	–
Прочность ровного льда на смятие, кПа	2270	2600	–
Толщина консолидированного слоя тороса, м	2,35	4,00	2,54*
Прочность консолидированного слоя тороса на изгиб, кПа	–	700	670,0
Прочность консолидированного слоя тороса на сжатие, кПа	–	2100	1 050
Глубина киля тороса, м	6,00	5,50	5,04*
Ширина киля тороса, м	–	32,0	70
Скорости дрейфа льда, м/с	0,15 и 1,00	0,15 и 0,79	0,15 и 0,81

Примечание. * — обеспеченностью 1 % при протяженности 70 м в мае–июне.

Note. * — the probability of occurring is 1 % for ridge with width 70 m, the time period is May–June

Анализ данных, приведенных в таблице, позволяет предположить, что в формулировке первого варианта ледовых условий на ранней стадии проектирования еще не сложилось окончательное представление о наиболее опасном сценарии воздействия льда на сооружение. Об этом, например, свидетельствуют выбранные для моделирования значения толщины ровного льда. В дальнейшем в качестве основного сценария, очевидно, был выбран сценарий 5 (взаимодействие с дрейфующими ледяными полями, образующимися в весенне-летний период после взлома припая).

В приведенной таблице хорошо видно, что по некоторым характеристиками имеются существенные расхождения. В первую очередь это касается характеристик торосов, а именно толщины консолидированного слоя. Расхождение в этой величине составляет примерно 1,6–1,7 раз, что довольно чувствительно для величины ледовых нагрузок.

Необходимо отметить еще одну особенность определения характеристик торосов для моделирования. В третьем варианте условий указывается, что величины толщины консолидированного слоя тороса и глубины его кия характерны для мая–июня и соответствуют ежегодной вероятности его превышения в соответствии с классом сооружения. Таким образом, при моделировании в ледовом бассейне воссоздается торос, у которого и глубина кия, и толщина консолидированного слоя соответствуют указанным величинам. Спрашивается: «Какова будет обеспеченность появления такого тороса с комбинацией параметров, каждый из которых определен независимо для заданной классом сооружения обеспеченности?» При выборе для моделирования каждой характеристики ледяного образования, рассчитанной независимо от другой для заданного периода обеспеченности, в опытовом бассейне воссоздаются практически не существующие природные объекты, о которых заранее можно сказать, что их моделирование приведет к завышению ледовой нагрузки.

Еще одной особенностью подбора исходных данных для моделирования является определение скорости дрейфа льда. Как правило, результаты гидрометеорологических изысканий содержат в себе лишь абсолютное значение этой скорости, в большинстве случаев соответствующее заданному направлению дрейфа льда. Но при моделировании гидротехнических сооружений, особенно тех, что расположены вблизи берега, помимо скорости дрейфа льда и его направления, очень важна продолжительность ледового воздействия. Она определяет не только уровень ледовой нагрузки, но и объем ледяных нагромождений, которые могут возникать вблизи сооружения. К сожалению, подобные исходные данные для моделирования редко предоставляются.

Для того чтобы устранить указанные затруднения, при проведении полевых исследований ледяного покрова необходимо учитывать ранее разработанный сценарий ледового воздействия на проектируемый инженерный объект. Результаты полевых исследований или расчетные значения характеристик должны соответствовать выбранному сценарию. Определяя ту или иную характеристику льда с заданным уровнем обеспеченности, важно знать, какими характеристиками в этом случае может обладать сам природный объект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены работы ледового бассейна КГНЦ, направленные на обеспечение проектирования, создания и функционирования технических объектов освоения Обской губы. Приведенные примеры убедительно показывают, что метод физического моделирования ледовой нагрузки на различные инженерные сооружения

является весьма эффективным. До сих пор, несмотря на развитие вычислительной техники и методов математического моделирования, модельный эксперимент является практически единственным способом получения необходимой для проектантов и эксплуатационников информации.

По результатам выполненных работ отмечено, что каждый сценарий моделирования должен содержать в себе максимальное значение лишь одного основного параметра льда, обеспеченность которого соответствует классу сооружения. К ряду основных параметров можно отнести толщину ледяного покрова, прочность на изгиб или сжатие, в зависимости от характера разрушения льда объектом исследований, и скорость дрейфа. Таким образом, для физического моделирования характеристики льда должны быть подобраны в соответствии с рассматриваемым основным параметром. Такой подход увеличивает количество моделируемых сценариев, но при этом позволяет воспроизвести в опытовом бассейне реальные ледовые условия и в ряде случаев снизить уровень ледовых нагрузок за счет того, что не рассматривается только один сценарий, являющийся комбинацией независимого расчета обеспеченных характеристик льда за весь период наблюдений.

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Competing interests. The authors have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисов В.И., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я. Новые экспериментальные возможности Крыловского государственного научного центра по изучению ледовых воздействий на объекты морской техники // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3 (19). С. 76–81.
2. Сазонов К.Е. Тертый лед — рукотворная проблема морской ледотехники // Природа. 2022. № 3 (1279). С. 15–26.
3. Сазонов К.Е. Движение судов в тертых льдах: результаты исследований // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 4. С. 406–424. doi:10.30758/0555-2648-2021-67-4-406-424.
4. Сазонов К.Е. Модельный и натурный эксперимент в морской ледотехнике. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2021. 306 с.
5. Сазонов К.Е., Добродеев А.А. Ледовая ходкость крупнотоннажных судов. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2017. 122 с.
6. Coche E., Kalinin A. Yamal LNG: Challenges of an LNG port in Arctic // Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 9–13, 2013. Espoo, Finland. 11 p. URL: https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_172.pdf (дата обращения: 15.03.2023).
7. Riska K., Blouquin R., Coche E., Shumovskiy S., Boreysha D. Modeling brash ice growth in ports // 22nd IAHN International Symposium on Ice (Singapore, August 11 to 15, 2014). Singapore, 2014. С. 853–859.
8. Андреев О.М., Гудошников Ю.П., Виноградов Р.А., Клячкин С.В. Ледовые каналы как лимитирующий фактор при проектировании терминалов отгрузки углеводородов в прибрежной зоне арктических морей // Вести газовой науки. 2019. № 2 (39). С. 46–52.
9. Виноградов Р.А., Андреев О.М., Драбенко Д.В., Скутин А.А. Инженерно-гидрометеорологические изыскания с учетом аккумуляции ледяной каши в арктических портах. Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации // Материалы 16-ой общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций. М., 2021. С. 277–284.

10. ITTC — Recommended Procedures and Guidelines. Guidelines for Modelling of Complex Ice Environments. 7.5-02-04-03. 2021. 15 p. URL: <https://www.ittc.info/media/9661/75-02-04-03.pdf> (дата обращения: 15.03.2023).
11. Казаков А.Т. Безопасная дистанция и выбор оптимальной скорости при ледокольной проводке: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1986, 24 с.
12. Сазонов К.Е. Теоретические основы плавления судов во льдах. СПб.: ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова, 2010. 274 с.
13. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Движение крупнотоннажных судов при дрейфе льда // Арктика: экология и экономика. 2020. № 2 (38). С. 68–76. doi: 10.25283/2223-4594-2020-2-68-76.
14. Благовидова И.Л., Тертышников А.С. Оценка глобальных ледовых нагрузок на ледостойкую стационарную платформу на месторождении Каменномыское-море // Морской вестник. 2020. № 1 (14). С. 34–37.
15. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под. ред. д-ра геогр. наук Е.У. Миронова. СПб.: ААНИИ, 2010. 320 с.
16. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Сооружения с вертикальной стенкой // Арктика: экология и экономика. 2020. № 4 (40). С. 77–89. doi: 10.25283/2223-4594-2020-4-77-89.
17. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Откосные сооружения с наклонной гранью // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 1. С. 90–100. doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100.
18. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456045544> (дата обращения: 15.03.2023).

REFERENCES

1. Denisov V.I., Sazonov K. E., Timofeev O.Ya. New experimental possibilities of Krylov State research Centre in ice interaction with marine structures researching. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economics. 2015, 3 (19): 76–81. [In Russian].
2. Sazonov K.E. Brash ice — a man-made problem of marine ice engineering. *Priroda*. Nature. 2022. 3 (1279): 15–26. doi:10.7868/S0032874X22030024. [In Russian].
3. Sazonov K.E. Ship operation in brash ice: results of investigations. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (4): 406–424. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-406-424>. [In Russian].
4. Sazonov K.E. *Modelnii i naturanii eksperiment v morskoi ledotehnike*. Model and full-scale experiment in marine ice engineering. St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2021: 306 p. [In Russian].
5. Sazonov K.E., Dobrodeev A.A. *Ledovaya hodkost krupnotonnajnih sudov*. Ice performance of large-size vessels. St. Petersburg: Krylov State Research Centre: 2017: 122 p. [In Russian].
6. Coche E., Kalinin A. Yamal LNG: Challenges of an LNG port in Arctic. Proceedings of the 22nd International conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 9–13, 2013. Espoo, Finland. 11 p. Available at: https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_172.pdf (accessed 15.03.2023).
7. Riska K., Blouquin R., Coche E., Shumovskiy S., Boreysha D. Modeling brash ice growth in ports. 22nd IAHR International Symposium on Ice. Singapore, August 11–15, 2014. Singapore, 2014: 853–859.
8. Andreev O.M., Gudoshnikov Yu.P., Vinogradov R.A., Klyachkin S.V. Ice channels as a limiting factor in the design of terminals for the shipment of hydrocarbons in the coastal zone of the Arctic seas. *Vesti Gazovoy Nauki*. News of gas science. 2019, 2 (39): 46–52. [In Russian].

9. Vinogradov R.A., Andreev O.M., Drabenko D.V., Skutin A.A. Engineering and hydrometeorological surveys taking into account the accumulation of ice porridge in Arctic ports. Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation. Materials of the 16th all-Russian scientific-practical conference of survey organizations. Moscow, 2021: 277–284. [In Russian].
10. ITTC — Recommended Procedures and Guidelines. Guidelines for Modelling of Complex Ice Environments. 7.5-02-04-03. 2021. 15 p. Available at: <https://www.ittc.info/media/9661/75-02-04-03.pdf> (accessed 15.03.2023).
11. Kazakov A.T. Safe distance and the choice of the optimal speed for icebreaking assistance. Aut. diss. for the competition uch. step. cand. tech. sciences. Leningrad, 1986: 24 p. [In Russian].
12. Sazonov K.E. *Teoreticheskie osnovy plavaniya sudov vo ldah*. Theoretical foundations of ship navigation in ice. St. Petersburg: Central Research Institute academician A.N. Krylova, 2010: 274 p. [In Russian].
13. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Motion of heavy-tonnage vessels in the ice drift conditions. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economics. 2020, 2 (38): 68–76. doi: 10.25283/2223-4594-2020-2-68-76. [In Russian].
14. Blagovidova I.L., Tertyshnikova A.S. Assessment of global ice loads on an ice-resistant fixed platform at the Kamennomysskoye-Sea field. *Morskoy Vestnik*. Sea Herald. 2020, 1 (14): 34–37. [In Russian].
15. *Opasnie ledovie yavleniya dlya sudohodstva v Arktike*. Dangerous ice phenomena for shipping in the Arctic. St. Petersburg: AARI, 2010: 320 p. [In Russian].
16. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Physical modeling of ice load on extended hydraulic constructions. The vertical wall constructions. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economics. 2020, 4 (40): 77–89. doi: 10.25283/2223-4594-2020-4-77-89. [In Russian].
17. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Physical modeling of ice load on extended hydraulic constructions. Sloping constructions with an inclined edge. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economics. 2021, 11 (1): 90–100. doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100. [In Russian].
18. SP 47.13330.2016. *Injenernie iziskaniya dlya stroitelstva. Osnovnie polojeniya*. Engineering surveys for construction. Basic provisions. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456045544> (accessed 15.03.2023). [In Russian].