

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА ПРОТЯЖЕННЫЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ. СООРУЖЕНИЯ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКОЙ

А. А. Добродеев

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

К. Е. Сазонов

Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 4 августа 2020 г.

Представлены результаты исследований, выполненных в лаборатории «Ледовый опытовый бассейн» Крыловского государственного научного центра, относящиеся к изучению воздействия льда на протяженные гидротехнические сооружения с вертикальной стенкой. Проанализированы возможности применения метода физического моделирования процессов взаимодействия таких сооружений со льдом в ледовом бассейне. Полученные результаты позволяют рекомендовать метод физического моделирования в качестве одного из основных подходов к изучению особенностей взаимодействия гидротехнических сооружений со льдом. Данные модельного эксперимента могут быть использованы для построения математических моделей протекающих процессов, а также для уточнения требований нормативных документов.

Ключевые слова: *протяженное гидротехническое сооружение, глобальная ледовая нагрузка, погонная ледовая нагрузка, навал льда, вертикальная стенка.*

Введение

Интенсификация хозяйственной деятельности в полярных регионах России требует постоянного развития транспортной инфраструктуры. Одним из важнейших направлений развития этой инфраструктуры является проектирование и строительство новых портов, предназначенных для отгрузки на современные крупнотоннажные суда ледового плавания нефти, сжиженного газа и насыпных грузов. В качестве примера можно указать порт Сабетта, успешно эксплуатирующийся в течение ряда лет [1]. В настоящее время проектируется еще несколько портов, таких как причалы для отгрузки СПГ при освоении Салмановского нефтегазоконденсатного месторождения в Обской губе, угольный терминал

на базе Сырадасайского месторождения и нефтяной терминал в бухте Север, расположенные в Енисейском заливе, а также другие объекты.

Все эти гидротехнические сооружения включают в себя довольно протяженные причальные стенки и дамбы, предназначенные для защиты акватории порта от негативных воздействий волнения и дрейфующего льда. При проектировании таких сооружений возникает необходимость в прогнозировании величины ледовой нагрузки, действующей на них, оценке параметров ледяных нагромождений, которые могут сформироваться в непосредственной близости, и вероятности наползания льда на поверхность. В настоящее время существует ряд методических подходов к оценке глобальной ледовой нагрузки на инженерные сооружения, их анализ дан в работе [2]. Наиболее часто для решения указанных

задач применяется либо нормативный подход, основанный на использовании расчетных методик нормативных документов, либо физический модельный эксперимент в ледовом бассейне. Особенности проведения экспериментов по определению глобальной ледовой нагрузки на ледостойкие добычные и разведочные платформы были рассмотрены в [3], однако в модельном исследовании взаимодействия льда и протяженных гидротехнических сооружений имеется ряд особенностей, рассмотрению которых и посвящена данная работа.

Описываемые и анализируемые в ней эксперименты были выполнены в ледовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» с моделями гидротехнических сооружений, имеющих вертикальную стенку. В следующем номере журнала планируется к опубликованию статья, демонстрирующая результаты экспериментальных исследований в ледовом бассейне откосных гидротехнических сооружений, имеющих наклонную грань по фронту воздействия ледяного покрова. Характеристики и экспериментальные возможности ледового бассейна подробно описаны в [4; 5]. Выполненная работа демонстрирует тренд развития бассейна, направленный на расширение имеющихся экспериментальных возможностей и компетенций.

Требования нормативных документов

Основной российский нормативный документ, регламентирующий методы определения ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения, — СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» [6]. В нем определяются сценарии взаимодействия со льдом различных по конструктивному типу сооружений. В соответствии с темой исследования рассмотрим более подробно, каким образом согласно нормативному документу предлагается определять ледовую нагрузку на протяженное сооружение с вертикальной стенкой.

Для сооружений с вертикальной передней гранью (причальных стенок) документ [6] предлагает следующую расчетную формулу для определения ледовой нагрузки:

$$F_{c,w} = 2,2 \cdot 10^{-3} V h_d \sqrt{A k_V \rho R_c}, \quad (1)$$

причем величина, определенная по формуле (1), не должна превышать результаты расчета по формуле

$$F_{c,w} = k k_V R_c b_s h_d. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) приняты следующие обозначения: V — скорость дрейфа ледяного поля, м/с; h_d — толщина ровного льда, м; A — максимальная площадь ледяного поля, м²; k_V — коэффициент, учитывающий эффективную скорость деформации; ρ — плотность воды; R_c — предел прочности льда при сжатии, МПа; k — коэффициент, зависящий от

отношения b_s/h_d и изменяющийся от 1 до 0,4, при $b_s/h_d > 25$ $k = 0,4$; b_s — ширина сооружения по фронту взаимодействия со льдом, м.

Анализ формул (1) и (2) позволяет сделать следующие выводы о пределах их применимости при назначении расчетной ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения.

Формула (1) восходит к известному сценарию взаимодействия инженерного сооружения со льдом — ограниченной кинетической энергии [7]. Этот сценарий реализуется, если после непродолжительного процесса взаимодействия сооружения со льдом происходит остановка дрейфующего ледяного покрова. Физически это означает, что запаса кинетической энергии ледяного образования, накопленного в результате воздействия на него ветра, течений и других ледяных образований, недостаточно для дальнейшего его разрушения.

Другим недостатком указанных формул является их линейная зависимость от протяженности сооружения (в формуле (1) $\sqrt{A} \approx b_s$). Такая зависимость приводит к неограниченному росту суммарной силы при увеличении протяженности сооружения. При выполнении расчетов эту трудность можно обойти, перейдя к некоторым средним значениям погонной ледовой нагрузки. Для этого формулы (1) и (2) необходимо разделить на b_s .

Важнейшим недостатком формул (1) и (2) является невозможность оценки с их помощью влияния возникших перед сооружением ледяных образований на уровень общей и погонной ледовой нагрузки на сооружение. В зависимости от целого ряда факторов, таких как геометрия сооружения, глубина акватории и др., ледяные образования могут приводить как к снижению, так и к увеличению ледовой нагрузки. Необходимо также отметить, что формулы (1) и (2) не позволяют оценить высоту образовавшихся нагромождений и, как следствие, степень распространения навала льда на сооружение. Определение высоты навала льда перед сооружением представляет собой еще мало исследованную достаточно сложную задачу, некоторые подходы к ее решению изложены в работе [8]. Существующие в настоящее время нормативные требования, такие как ГОСТ Р 54483-2011 «Платформы морские для нефтегазодобычи. Общие требования» [9], ISO/DIS 19000:2018 [10] и ISO 19904-1:2017 «Плавающие морские сооружения» [11], не всегда можно использовать для протяженных гидротехнических сооружений. Анализ этих требований содержится в [12].

Модельный эксперимент

Многие из перечисленных трудностей могут быть преодолены при проведении модельного эксперимента в ледовых бассейнах. По сравнению с расчетом по формулам, приведенным в нормативных документах, физическое моделирование имеет ряд существенных преимуществ. В первую очередь к ним относится возможность практически точного

воссоздания геометрических параметров объекта и прилегающей к нему акватории. Это позволяет изучать влияние на уровень воспринимаемой сооружением ледовой нагрузки не только макрофакторов, таких как конструктивный тип сооружения и глубина акватории, но и локальных особенностей формы конструкции. Второе важнейшее преимущество физического моделирования — возможность непосредственного наблюдения и фиксации развития физических процессов взаимодействия сооружения со льдом во времени. Анализ таких результатов позволяет судить о том, какие физические процессы вносят наибольший вклад в формирование ледовой нагрузки, наметить возможные пути снижения этой нагрузки.

Несмотря на перечисленные и другие преимущества физического моделирования, при планировании и выполнении модельного эксперимента возникает целый ряд трудностей, которые сужают возможности такого подхода. В данной работе более подробно рассмотрены трудности, возникающие при проведении экспериментов с моделями протяженных гидротехнических сооружений, более полную информацию можно подчерпнуть в [3].

При проведении исследований первая и самая существенная трудность заключается в выборе масштаба модели. Портовые гидротехнические сооружения (причалные стенки, дамбы и пр.) имеют характерный линейный размер порядка до 1000 м, характерные же размеры чаш ледовых бассейнов составляют: по длине менее 100 м, а по ширине примерно 10 м [5]. Очевидно, что в подавляющем большинстве случаев поместить полную модель гидротехнического сооружения в ледовом бассейне невозможно. Неизбежно встает вопрос о необходимости неполного (в геометрическом смысле) моделирования исходного объекта. Такой подход подразумевает возможность экстраполяции тем или иным способом полученных на неполной модели результатов на сооружение в целом. Очень часто такая экстраполяция осуществляется путем перехода к погонной нагрузке.

В настоящее время не существует каких-либо общих рекомендаций для выбора параметров неполной модели сооружения. Обычно выбор параметров неполной модели выполняется экспериментатором на основе имеющегося у него опыта с учетом конкретных особенностей проекта, предполагаемого характера протекания процессов взаимодействия со льдом, особенностей экспериментального оборудования ледового бассейна и других факторов. Предложенный экспериментатором для исследований вариант неполной модели обосновывается и обязательно согласуется с заказчиком испытаний.

На выбор масштаба модели большое влияние оказывают физические закономерности приготовления моделированного льда в ледовом бассейне, а также технические характеристики самого бассейна. В соответствии с требованиями геометрического

подобия толщина моделированного льда в ледовом бассейне должна быть уменьшена в λ раз, где λ — масштаб модели. Этим же закономерности должны быть подчинены и прочностные свойства моделированного льда. В российской Арктике толщина ровного термического льда редко превышает 2 м [13]. В то же время в ледовых бассейнах практически невозможно создать моделируемый ледяной покров толщиной менее 12—15 мм.

При выборе масштаба модели необходимо также помнить о следующем обстоятельстве. В отличие от взаимодействия тел с газами и жидкостями, несущего непрерывный характер, взаимодействие со льдом имеет дискретный характер, который формируется конечным размером обломков разрушаемого льда. Поэтому геометрические характеристики модели должны быть такими, чтобы результат измерений, усредненный динамометром, мог считаться корректным. При выполнении подобных оценок обычно исходят из того, что характерный размер обломка l_c

$$l_c \approx k^4 \sqrt{\frac{Eh_d^3}{\rho g}}, \quad (5)$$

где E — модуль Юнга льда; k — коэффициент пропорциональности.

Практически всегда испытания моделей протяженных гидротехнических сооружений проводятся по схеме обращенного движения. При этом модель буксируется через неподвижное ледяное поле, что прямо противоположно происходящему в натуральных условиях. Потенциально ледовые бассейны могут проводить испытания и по схеме прямого движения. Для этого модель сооружения должна быть закреплена в некоторой точке ледового бассейна, а поле моделированного льда может быть надвинуто на нее с помощью буксировочной тележки. Основными недостатками использования прямой схемы являются большие затраты времени на подготовку эксперимента и повышенная вероятность разрушения надвигаемого ледяного покрова при образовании магистральных трещин. Специальные эксперименты, проведенные в ледовом бассейне Крыловского центра, показали эквивалентность результатов измерения глобальной ледовой нагрузки при использовании как схемы обращенного движения, так и схемы прямого движения [14].

Описание экспериментов

В ледовом бассейне были проведены модельные испытания двух прорабатываемых концепций причалов, разработка которых ведется применительно к нескольким арктическим терминалам отгрузки добываемого сырья на суда. Натурная протяженность рассматриваемых сооружений составляет чуть более километра, что определило использование для проведения экспериментов подхода, основанного на изготовлении неполных моделей. Основная осо-

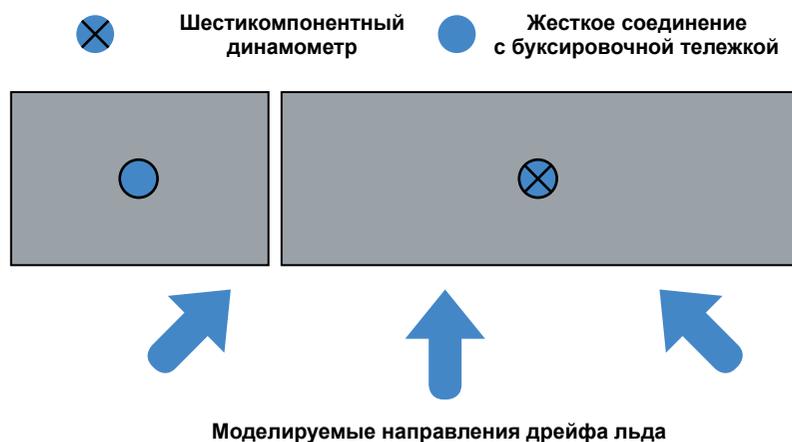


Рис. 1. Эскиз модели причала с указанием углов ее установки относительно поля моделированного ледяного покрова
 Fig. 1. Sketch of the berth model showing the angles of its installation relative to the field of the simulated ice cover

бенность такого рода экспериментов заключается в представлении полученных результатов. Так как модель является неполной, измеренная глобальная ледовая нагрузка не дает возможности оценить эффективность формы сооружения с точки зрения восприятия ледового воздействия. Поэтому результаты измерений целесообразно представлять в виде погонной нагрузки от воздействия заданного ледяного образования. Затем такая информация может быть использована проектантом для определения уровня ледовой нагрузки на заданную секцию или всё гидротехническое сооружение. При рассмотрении сценария одновременного воздействия различных ледяных образований, например тороса и ровного льда, на причальные сооружения допустимо, имея данные о погонной ледовой нагрузке, применять комбинированный расчет. Он основан на суммировании нагрузок от тороса и ровного льда, воздействующих на различные участки причального сооружения заданной протяженности.

Конструктивные схемы рассматриваемых причальных стенок (далее в статье причалы 1 и 2) предполагали возможность их взаимодействия с дрейфующим льдом не только фронтальной стороной, но и боковой гранью (рис. 1). Это обстоятельство определило выбор размеров и общего облика моделей сооружений для испытаний. Модели были изготовлены разрезными, состоящими из двух частей: большей по размерам, на которой измерялась ледовая нагрузка, и относительно небольшой, которая была жестко закреплена. Меньшая часть была необходима для выделения из результатов экспериментов при косых углах дрейфа ледовой нагрузки, действующей одновременно на фронтальную и боковую грани и только на фронтальную грань. Обе части модели были установлены на единой поворотной раме, соединенной с буксировочной тележкой, технологический зазор между элементами модели составлял несколько миллиметров. Дно акватории имитировалось с помощью перемещаемого по

подводным рельсам устройства, имеющего горизонтальную поверхность размером 4×4 м и жестко связанного с буксировочной тележкой бассейна. Это устройство описано в [3—5].

Модель причала 1 была изготовлена в масштабе 1:100, а причала 2 — 1:60. Экспериментальные исследования моделей причалов проводились в сплошных ровных и торосистых льдах. Толщина льда, скорость его дрейфа, а также геометрические характеристики торосистых образований выбирались на основании исходной гидрометеорологической и гидрологической информации, полученной в результате натурных наблюдений и представленной заказчиком для каждой акватории, где предполагается строительство терминалов.

Эксперименты проводились в моделированном ледяном поле постоянной толщины, через которое буксировалась модель с различной скоростью (рис. 2). В каждом отдельном эксперименте скорость буксировки модели была постоянной. В процессе этих экспериментов с помощью шестикомпонентного динамометра фиксировалась глобальная ледовая нагрузка на модель. После каждого эксперимента выполнялось измерение геометрических размеров надводных и подводных нагромождений льда перед моделью, после чего модель очищалась ото льда для выполнения следующего эксперимента. После выполнения всех скоростных режимов при первом установочном угле модели относительно направления дрейфа льда аналогичные испытания проводились при следующих значениях установочного угла.

Для изучения особенностей взаимодействия моделей с торосистыми образованиями в ледовом бассейне сначала создавалось поле моделированного льда, толщина которого выбиралась таким образом, чтобы сохранялась техническая возможность формирования консолидированного слоя с заданными характеристиками. Во время указанных испытаний из поля ровного льда были приготовлены три торо-

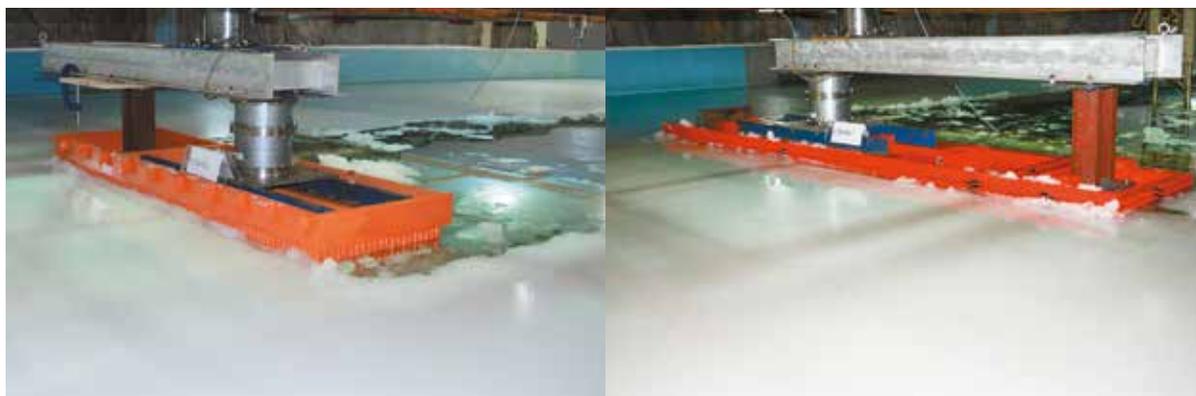


Рис. 2. Смонтированные на буксировочной тележке модели причалов 1 (а) и 2 (б)
Fig. 2. Trolley-mounted models of berths 1 (a) and 2 (b)

систых гряды примерно одинаковых размеров. Через эти гряды осуществлялась буксировка моделей при трех значениях установочных углов, моделирующих направления дрейфа ледяного покрова (см. рис. 1). В ходе экспериментов измерялись характеристики торосов, физико-механические свойства льда, ледовые нагрузки, параметры ледяных нагромождений и высота наползания льда.

Анализ и обсуждение результатов

Взаимодействие с ровным ледяным покровом. В табл. 1 и 2 приведены значения погонной нагрузки применительно к двум рассматриваемым

моделям причалов. Первоначально было определено среднее значение пиковых нагрузок на участке временной реализации, соответствующей установившемуся процессу взаимодействия сооружения со льдом. Затем путем деления полученной нагрузки на протяженность элемента сооружения, на котором производилось измерение ледовой нагрузки, была определена погонная ледовая нагрузка (далее на рис. 3 красным цветом показаны те пиковые нагрузки, которые использовались при расчете среднего значения).

Представленные в табл. 1 и 2 данные можно сопоставить с результатами расчетов по формуле (2).

Таблица 1. Максимальные среднепиковые значения погонной ледовой нагрузки, пересчитанной на натурные условия (причал 1)

Относительная глубина воды D/h_p , м	Направление дрейфа льда α , град	Скорость дрейфа льда V , м/с	Измеренные составляющие погонной ледовой нагрузки, МН/м	
			P_x	P_y
<i>Ровный ледяной покров, толщина льда $h_l = 1,9$ м</i>				
9,3	0	1,15	2,0	0,4
9,3	0	0,30	1,6	0,2
9,3	-45	1,15	1,6	0,7
9,3	-45	0,30	1,7	0,4
9,3	45	1,15	1,5	0,3
9,3	45	0,30	1,3	0,5
<i>Ровный ледяной покров, толщина льда $h_l = 1,5$ м</i>				
11,7	0	1,15	1,1	0,1
11,7	0	0,30	0,9	0,1
11,7	-45	1,15	0,9	0,2
11,7	-45	0,30	0,7	0,2
11,7	45	1,15	0,9	0,7
11,7	45	0,30	0,8	0,5

Таблица 2. Максимальные среднепиковые значения распределенной ледовой нагрузки, пересчитанной на натурные условия (причал 2)

Относительная глубина воды D/h_p , м	Направление дрейфа льда α , град	Скорость дрейфа льда V , м/с	Измеренные составляющие погонной ледовой нагрузки, МН/м	
			P_x	P_y
<i>Ровный ледяной покров. Толщина льда $h_l = 2,4$ м</i>				
4,7	0	1,28	2,4	0,2
4,7	0	0,30	2,6	0,2
4,7	-45	1,28	2,4	1,0
4,7	-45	0,30	2,1	0,7
4,7	45	1,28	2,0	0,9
4,7	45	0,30	1,8	0,7

Эта формула выбрана потому, что она предполагает взаимодействие сооружения с не имеющим конечных размеров ледяным покровом. Именно эти условия и реализуются при проведении испытаний в ледовом бассейне. При выполнении расчетов по формуле (2) в качестве исходной информации использовались значения физико-механических свойств льда, полученные в ледовом бассейне во время выполнения экспериментов. В результате были получены следующие значения погонной ледовой нагрузки:

- для причала 1:
 - при толщине льда 1,9 м 1,9 МН/м при $V = 1,15$ м/с и 1,7 МН/м при $V = 0,3$ м/с;
 - при толщине льда 1,5 м 1,3 МН/м при $V = 1,15$ м/с и 1,2 МН/м при $V = 0,3$ м/с;
- для причала 2:
 - при толщине льда 2,44 м и 2,3 МН/м при $V = 1,28$ м/с и 1,3 МН/м при $V = 0,3$ м/с.

Сравнение результатов расчетов по формуле (2) с данными таблиц показывает, что в большинстве случаев расхождение между расчетом и экспериментом не превышает 20%. Тем не менее в двух случаях оно близко к 50%, причем эти существенные отклонения относятся к наибольшей и наименьшей толщинам льда и скоростям его дрейфа. Повидимому, одним из основных источников расхождения служит входящий в формулу (2) коэффициент k_v , который должен учитывать влияние скорости дрейфа льда на величину ледовой нагрузки. Подробное рассмотрение этого коэффициента на основании данных, приведенных в [6], показывает, что он отражает хорошо известное изменение величины предела прочности льда на сжатие при изменении скорости деформации или скорости нагружения [15; 16]. По своей сути коэффициент k_v учитывает изменение заданного предела прочности льда на сжатие при изменении скорости дрейфа льда, взаимодействующего с сооружением. Из этого следует, что k_v должен быть одинаковым для натуральных и модель-

ных условий, так как в модельном эксперименте прочность льда в соответствии с критериями моделирования должна уменьшаться в λ раз, где λ — масштаб модели. Однако в соответствии с документом [6] $k_v = f(\dot{\epsilon})$, где $\dot{\epsilon}$ — эффективная скорость деформации льда в зоне его взаимодействия с элементом сооружения (c^{-1}), определяемая по формуле $\dot{\epsilon} = V / (k_l b)$, где k_l — коэффициент, принимаемый при b/h_l (или b_s/h_l) ≤ 15 равным 4, а при b/h_l (или b/h_s) ≤ 25 равным 2; при $15 \leq b/h_l$ (или b/h_s) ≤ 25 коэффициент k_l определяется линейной интерполяцией между значениями 4 и 2; b — протяженность преграды, м; h_l — толщина льда, м, V — скорость дрейфа, м/с.

Из приведенного выражения следует, что $\dot{\epsilon}_m = \sqrt{\lambda} \dot{\epsilon}_{fs}$, где $\dot{\epsilon}_m$ и $\dot{\epsilon}_{fs}$ — эффективные скорости деформации в модельных и натуральных условиях соответственно. Указанное обстоятельство не позволяет проводить корректное сравнение результатов модельного эксперимента и расчетов по формуле (2).

Рассмотрим более подробно характер временных зависимостей ледовой нагрузки на модели гидротехнических сооружений. На рис. 3 приведены временные зависимости некоторых компонент ледовой нагрузки на причалы 1 и 2.

Первое, что обращает на себя внимание при анализе представленных на рисунках данных, — это циклический характер ледовой нагрузки на сооружение с вертикальной стенкой. Причем можно выделить циклическость двух типов: условно с «высокой» и «низкой» частотой. «Высокая» частота, по всей видимости, связана с процессами дробления и локального скола ледяного покрова при контакте с вертикальной стенкой. Такие процессы довольно подробно описаны в литературе [7]. Расчетные формулы нормативных документов, например формулы (1) и (2), обычно базируются именно на таком понимании процессов взаимодействия со льдом сооружений с вертикальной стенкой.

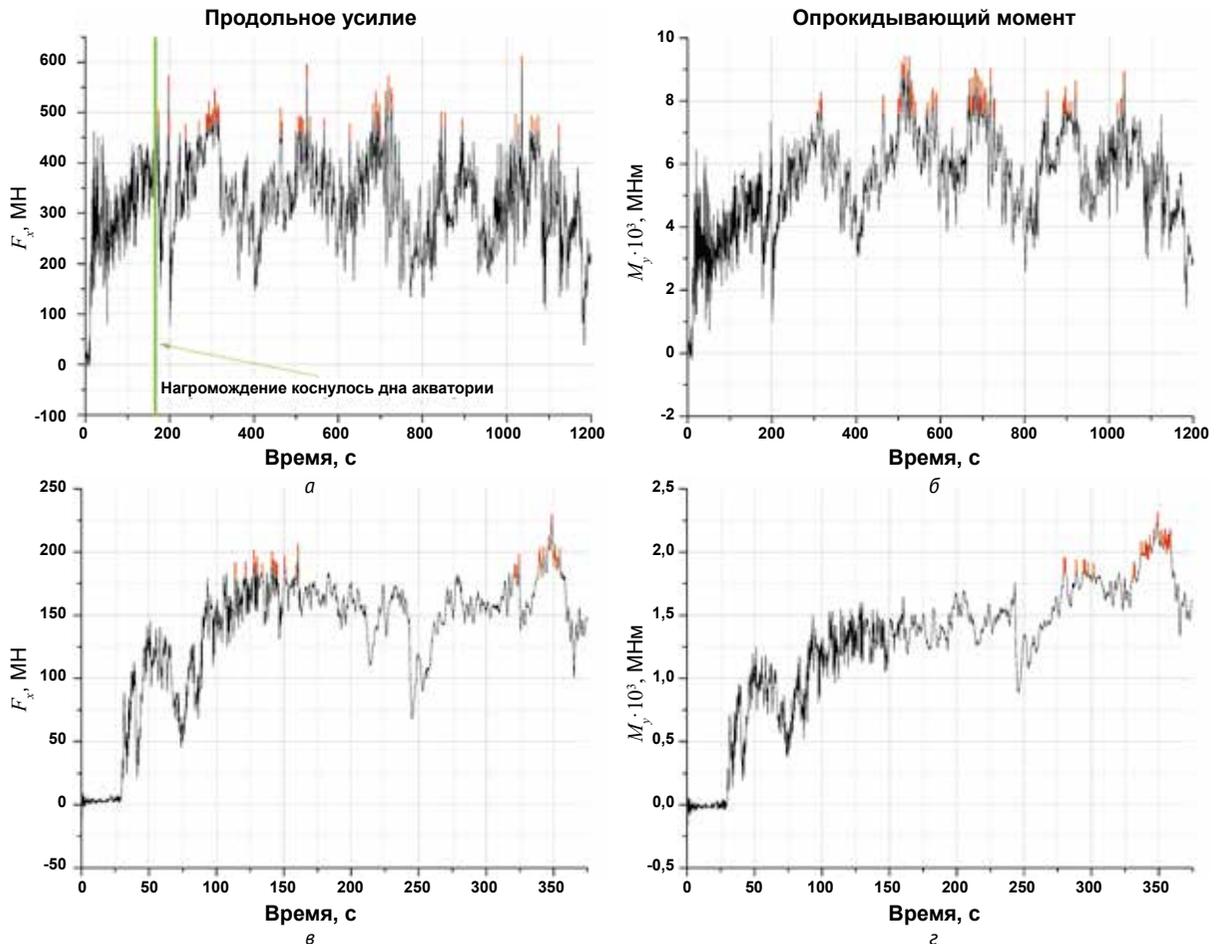


Рис. 3. Временные зависимости ледовой нагрузки на причалы 1 и 2 для максимальной скорости дрейфа льда и фронтальном воздействии ледяного покрова: а, б – причал 1, толщина льда 1,9 м; в, г – причал 2, толщина льда 2,44 м
 Fig. 3. Time dependences of ice load on berths 1 and 2 for maximum ice drift speed and frontal impact of ice cover: а, б – berth 1 ice thickness 1.9 m; в, г – berth 2 ice thickness 2.44 m

Наличие во временных реализациях ледовой силы «низкой» частоты свидетельствует о существенном влиянии на процесс взаимодействия других физических факторов. В данном случае речь идет о влиянии разрушения ледяного покрова изгибом на общий уровень ледовой нагрузки. Следует отметить, что необходимость учета деформации и разрушения ледяного поля изгибом возникает вследствие большой протяженности исследуемых сооружений. Важнейшим параметром, определяющим именно такой характер взаимодействия, является то, что $b_s/h_d \gg 1$. В данном случае речь идет о размерах модели и толщине моделированного льда. Когда это неравенство не выполняется, влияние изгибных деформаций на процесс взаимодействия стремится к нулю. Об этом свидетельствуют результаты испытаний цилиндрических индентеров, которые протаскивались через ледяное поле [17].

Теоретически возможны два различных механизма возникновения изгибных деформаций в ледяном поле, взаимодействующем с вертикальной стенкой. Первый механизм [18; 19], обычно реализующийся на начальных стадиях процесса, связан с действи-

ем больших по величине горизонтальных сил, точка приложения которых не совпадает с нейтральной плоскостью ледяного покрова. Действие таких сил приводит к возникновению изгибающего момента, приложенного к кромке ледяного покрова. Это влечет образование относительно крупных обломков льда на начальных стадиях процесса. Второй механизм связан с накоплением на верхней поверхности ледяного покрова обломков льда, образовавшихся при разрушении льда дроблением и сколом [20]. Когда вес этих обломков превысит некоторое критическое значение, происходит локальный пролом ледяного покрова. По всей видимости, именно такие локальные разрушения ответственны за формирование наблюдаемой цикличности с «низкой» частотой. На параметры этой цикличности помимо толщины и прочности льда существенное влияние оказывает глубина акватории, на которой расположено сооружение с вертикальной стенкой. От данного параметра зависит, когда ледяное нагромождение перед сооружением сядет на дно. После того как это произойдет, можно считать, что в дальнейшем нагрузка на сооружение не будет возрастать. Это



Рис. 4. Максимальная протяженность языка нагромождения. Протяженность воздействующего поля ровного льда 400 м в натуральных условиях
 Fig. 4. The maximum length of the ice pileup tongue. The length of the impacting field of flat ice 400 m in natural conditions

утверждение базируется на том, что подходящий к сооружению лед будет разрушаться дроблением и изгибом уже на ледяном нагромождении, но при этом часть ледовой нагрузки будет воспринимать дно акватории.

При проведении рассматриваемых в статье экспериментов длина моделированного ледяного поля, с которым взаимодействовала модель, выбиралась таким образом, чтобы гарантированно обеспечить посадку ледяного образования перед моделью на дно. Выполнение этого условия в процессе каждого эксперимента отслеживалось с помощью подводных видеокамер и подтверждалось после его окончания путем измерения геометрических параметров образовавшегося нагромождения.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что процессы взаимодействия сооружения с вертикальной стенкой довольно сложны и не поддаются описанию простыми соотношениями типа формул (1) и (2). Адекватная расчетная математическая модель должна рассматривать и описывать различные составляющие общего процесса взаимодействия со льдом, например так, как это сделано в расчетном методе К. Кросдейла [20] для морских добычных платформ. Важным условием создания корректной расчетной модели является требова-

ние выполнения расчетов для достаточно большого промежутка времени, позволяющего рассчитать всю нестационарную часть процесса, включая формирование ледяных нагромождений и их посадки на дно акватории. Наиболее полную информацию для разработки и проверки работоспособности таких методов может дать только модельный эксперимент.

Формирование ледяных нагромождений перед сооружением — один из важных моментов при модельных исследованиях. Эти исследования важны не только с точки зрения создания и уточнения расчетных схем определения ледовой нагрузки, но и имеют большое прикладное значение. Отметим, что в настоящее время нормативные документы не позволяют оценить размеры ледяных нагромождений перед протяженными гидротехническими сооружениями.

Рассмотрим характерные особенности формирования ледяных нагромождений на примере причала 1.

Воздействие дрейфующего ровного льда на причал приводит к образованию нагромождений, состоящих из его обломков. Размеры нагромождений существенно зависят от продолжительности воздействия льда на сооружение и направления дрейфа. При фронтальном воздействии льда (на-

правление дрейфа 0°) происходит накопление его обломков перед вертикальной стенкой причала. Протяженность языка нагромождения увеличивается пропорционально времени воздействия ледяного покрова до того момента, пока его форма не станет обтекаемой. В этом случае при виде сверху язык нагромождения имеет форму треугольника, основание которого проходит вдоль вертикального борта причала (рис. 4). По периметру нагромождения происходит разрушение надвигающегося льда, а также постепенный унос обломков льда за пределы сооружения. В ходе экспериментов также определяется максимально возможная протяженность нагромождения, но это требует увеличения длины пробега и остановки эксперимента по факту визуальной фиксации обтекания нагромождения обломками льда без существенного увеличения длины его языка и циклического изменения максимальных значений ледовой нагрузки.

Анализ полученных временных реализаций ледовой нагрузки показал, что увеличение протяженности нагромождения после того, как оно закрепилось на дне акватории, не приводит к существенному росту ледовой нагрузки, при этом сама нагрузка изменяется циклически, что свидетельствует о протекании процессов разрушения ледяного покрова на ледяном нагромождении (выделено зеленой линией на рис. 3а).

При рассмотрении воздействия льда на причал при косом угле дрейфа (направления 45° и -45°) картина образования ледяных нагромождений меняется, но незначительно:

- вдоль короткой стороны причала наблюдается унос обломков льда, поэтому протяженность языка нагромождения не растёт;
- вдоль длинной стороны причала, после образования стамухи, интенсивность уноса обломков льда за пределы сооружения снижается, что приводит к росту языка ледяного нагромождения.

Результаты экспериментальных исследований также служат основанием для выбора высоты причала или ледозащитной стенки, установки ледозащитных сооружений или специальных отбойных устройств на верхних границах гидротехнического сооружения. Критерием оценки необходимости оптимизации причалов или установки дополнительных ледозащитных сооружений являются параметры наплавания льда на их поверхность.

Картина образования ледяных нагромождений у рассматриваемого в настоящей статье причала 2 аналогична описанной выше.

Изучение характера ледяных нагромождений, образующихся перед моделями протяженных гидротехнических сооружений с вертикальной стенкой, а также перед моделями морских добычных платформ [3; 21], позволило выявить ряд закономерностей их формирования. Важнейшими факторами в рассматриваемых процессах являются геометрические размеры сооружения и глубина акватории.

Геометрические размеры в первую очередь сказываются на развитии процессов уноса разрушенного льда от сооружения. Глубина акватории во многом определяет форму и размеры языка нагромождения. Двойную роль в формировании нагромождения играет толщина льда. Однозначно можно констатировать, что при увеличении толщины льда увеличиваются размеры нагромождения, при этом коэффициент его заполнения льдом снижается. Из более тонких льдов нагромождение получается более плотным. Поэтому иногда нагромождение из относительно тонких льдов может создавать большую ледовую нагрузку, чем из более толстых. В настоящее время эти вопросы еще практически не изучены и требуют продолжения исследований.

Взаимодействие с торосистыми образованиями, как известно, представляет наибольшую опасность для любых морских и гидротехнических сооружений [22; 23], тем не менее подавляющее большинство нормативных документов не содержит рекомендаций по расчету такой ледовой нагрузки. Это объясняется целым рядом объективных причин, главной из которых является отсутствие общепринятой математической модели торосистого образования, связанное с очень большой изменчивостью его морфологических свойств, неоднозначностью определения основных физико-механических параметров тороса и др. Поэтому практически единственным способом оценки уровня ледовой нагрузки на гидротехническое сооружение является модельный эксперимент.

В описываемых в работе исследованиях была выполнена серия экспериментов по взаимодействию моделей сооружений с торосистыми образованиями с заданными толщиной консолидированного слоя $H_{кс}$ и глубиной килля H_k . Ниже представлены и обсуждены некоторые из полученных результатов. В табл. 3 показаны значения максимальной погонной нагрузки, полученной в этих экспериментах. Также приведены результаты для трех сценариев, как и в случае представления данных по ледовым нагрузкам от ровного льда, — фронтальное воздействие (угол между вектором скорости дрейфующего льда и стенкой причала составляет 90°), воздействие при косых углах дрейфа (при угле -45° измеряется нагрузка от взаимодействия льда с фронтальной гранью, при угле 45° — с фронтальной и боковой гранями). Сравнение данных табл. 3 с табл. 1 и 2 убедительно подтверждает вывод о существенном возрастании ледовой нагрузки при взаимодействии с торосом.

При взаимодействии с торосистыми образованиями несколько изменяется картина формирования нагромождения у сооружения. В основных чертах она остается такой же, как и при взаимодействии с ровным льдом, при этом дополняется разрушением консолидированного слоя изгибом за счет наплавания на нагромождение и модель сооружения. Повышенная по сравнению с ровным льдом толщину

Таблица 3. Погонная ледовая нагрузка на рассматриваемые причалы от тороса

Ледовые условия	Воздействие льда перпендикулярно стенке причала	Воздействие льда под углом -45° к стенке причала	Воздействие льда под углом 45° к стенке причала
Причал 1			
Торос. $H_{к.с} = 2,7$ м; $H_{к} = 15,0$ м	3,17	2,4	2,7
Причал 2			
Торос. $H_{к.с} = 2,4$ м; $H_{к} = 12,0$ м	2,53	—	1,87

на консолидированного слоя тороса приводит к образованию более крупных обломков льда (размер в поперечнике — от 10 до 20 м), что несколько изменяет конфигурацию и коэффициент заполнения нагромождения. При недостаточно развитом нагромождении подводная часть причала взаимодействует с килем тороса, препятствуя его свободному движению. Это приводит к тому, что обломки льда, составляющие киль тороса, частично выдавливаются вверх, увеличивая размеры нагромождения. В процессе взаимодействия может наблюдаться раскалывание консолидированного слоя тороса, сопровождающееся формированием обломков крупнобитого льда.

Выводы

Приведенные в статье результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Формулы, предложенные в нормативном документе СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» для определения глобальной нагрузки на гидротехнические сооружения с вертикальной стенкой, не отражают всей полноты происходящих физических процессов. В этих формулах учтены лишь процессы дробления и скола ледяного покрова, дрейфующего на вертикальную стенку.

2. Эксперименты с моделями сооружений в ледовом бассейне, основанные на физическом моделировании происходящих процессов, позволяют детально изучить характер взаимодействия сооружения со льдом. Анализ экспериментальных материалов показывает, что уровень ледовой нагрузки на модель сооружения определяется не только процессами дробления и скола льда, но и процессами образования ледяного нагромождения перед сооружением, разрушением ледяного покрова изгибом под весом надводной части нагромождения, возможностью посадки нагромождения на дно акватории и др. В настоящее время адекватные математические модели указанных процессов еще не разработаны, поэтому роль модельного эксперимента в их изучении продолжает оставаться весьма значимой.

3. При определении ледовой нагрузки на сооружения важно корректно определять геометрические параметры ледяных нагромождений. Информация об этих параметрах необходима для разработки математических моделей процессов взаимодействия гидротехнических сооружений со льдом. Кроме того, она имеет большое практическое значение, позволяя оценить вероятность попадания льда в рабочие зоны инженерных сооружений. Поэтому исследование механики образования ледяных нагромождений представляет собой важную теоретическую и практическую задачу.

4. Наибольшую опасность для протяженных гидротехнических сооружений представляют торосистые образования. Взаимодействие с ним приводит к возникновению наибольшего ледового воздействия на сооружение. Кроме того, взаимодействие с торосом может спровоцировать резкое увеличение геометрических размеров ледяных нагромождений. В настоящее время модельный эксперимент является единственной возможностью изучения таких взаимодействий.

Литература

1. Спирин А. М., Чачин Д. А., Смирнов А. А. Круглогодичная навигация на порт Сабетта // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 3 (19). — С. 88—95.
2. Добродеев А. А., Сазонов К. Е., Тимофеев О. Я. Глобальная нагрузка на морские инженерные сооружения. Методы определения // Науч.-техн. сб. Рос. мор. регистра судоходства. — 2015. — № 38/39. — С. 61—65.
3. Добродеев А. А., Сазонов К. Е. Модельный эксперимент по определению ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения // Труды Крылов. науч. центра. — 2019. — № 2 (388). — С. 24—40.
4. 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.
5. Боруевич В. О., Русецкий А. А., Сазонов К. Е., Соловьев И. А. Современные гидродинамические лабо-

- ратории. — СПб.: ФГУП «Крылов. гос. науч. центр», 2019. — 316 с.
6. СП 38.13330.2018 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82*. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/553863434>.
7. Løset S., Shkhinek K. N., Gudmestad O. T., Høyland K. V. Actions from ice on Arctic Offshore and Coastal Structures. — Trondheim; St. Petersburg; Moscow; Krasnodar: Publ. «LAN», 2006. — 271 p.
8. Осипенко Н. М. О модели развития навала льда у преграды // Науч.-техн. сб. «Вести газовой науки». — 2018. — № 4 (36). — С. 131—138.
9. ГОСТ Р 54483-2011 (ISO 19000:2002). Нефтяная и газовая промышленность. Платформы морские для нефтегазодобычи. Общие требования. — М.: Стандартиформ, 2012.
10. ISO/DIS 19000:2018. Petroleum and natural gas industries. General requirements for offshore structure. — URL: www.iso.org.
11. ISO/DIS 19004-1:2017. Petroleum and natural gas industries. — Floating offshore structures. — Pt. 1: Ship-shaped, semi-submersible spar and shallow-draught cylindrical structures. — URL: www.iso.org.
12. Благовидов Л. Б., Благовидова И. Л., Тертышников А. С. Сравнительный анализ требований нормативных документов к выбору размера вертикального клирена для морских стационарных ледостойких нефтегазовых платформ // Науч.-техн. сб. Рос. мор. регистра судоходства. — 2018. — № 52/53. — С. 106—112.
13. Доронин Ю. П., Кубышкин Н. В. Рост и таяние морского льда. — СПб.: Гидрометеиздат, 2001. — 42 с.
14. Карулин Е. Б., Карулина М. М., Благовидов Л. Б. Модельные исследования взаимодействия со льдом платформы кессонного типа на мелководье // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2007. — Вып. 34 (318). — С. 5—21.
15. Доронин Ю. П., Хейсин Д. Е. Морской лед. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 318 с.
16. Уикс У. Ф., Ассур А. Разрушение озерного и морского льда // Разрушение / Под ред. Г. Либовица. — Т. 7: Разрушение неметаллов и композитных материалов. — Ч. 1: Неорганические материалы. — М.: Мир, 1976. — С. 513—623.
17. Zvyagin P., Dobrodeev A., Sazonov K. Ice loads dynamics for model scale cylinders of various diameters // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 2017.
18. Апполонов Е. М., Нестеров А. Б., Тимофеев О. Я. Регламентация ледовых нагрузок на вертикальный борт при сжатии во льдах // Науч.-техн. сб. Рос. мор. регистра судоходства. — 2008. — Вып. 31. — С. 129—146.
19. Сазонов К. Е., Симакина А. А., Тимофеев О. Я. Изгиб ледяного поля под действием момента // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2020. — В печати.
20. Palmer A., Croasdale K. Arctic Offshore Engineering. — Singapore: World Scientific Publ., 2013. — 357 p.
21. Добродеев А. А., Сазонов К. Е., Бойцун И. И. Сравнительный анализ различных типов опорных оснований объектов обустройства месторождений в Каспийском море // Труды Крылов. гос. науч. центра. — 2015. — Вып. 88 (372). — С. 203—210.
22. Алексеев Ю. Н., Афанасьев В. П., Литонов О. Е. и др. Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа. — СПб.: Гидрометеиздат, 2001. — 360 с.
23. Вершинин С. А., Трусов П. А., Кузмичев К. В. Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа. — М.: Ин-т Гипростроймост, 2005. — 208 с.

Информация об авторах

Добродеев Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, начальник сектора, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), e-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru.

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

Библиографическое описание данной статьи

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.

PHYSICAL MODELING OF ICE LOAD ON EXTENDED HYDRAULIC CONSTRUCTIONS. THE VERTICAL WALL CONSTRUCTIONS

Dobrodeev A. A.

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

Sazonov K. E.

Krylov State Research Centre, Saint-Petersburg State Marine Technical University (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on August 4, 2020

Abstract

The authors present the results of studies carried out in the laboratory “Ice tank” of the Federal State Unitary Enterprise “Krylov State Research Centre”, related to the study of the ice effect on extended hydraulic constructions with a vertical wall. They analyze the possibilities of applying the method of physical modeling to investigate the processes of ice-construction interaction in ice tank. The results make it possible to recommend the method of physical modeling as one of the main approaches for studying the interaction specifics of hydraulic constructions with ice. The data of the model experiment can help to construct mathematical models of ongoing processes, as well as to clarify the requirements of regulatory documents.

Keywords: *extended hydraulic construction, global ice load, linear ice load, ice pileup, vertical wall.*

References

1. Spirin A. M., Chachin D. A., Smirnov A. A. Kruglogodichnaya navigatsiya na port Sabetta. [Year-round navigation in the port of Sabetta]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2015, no. 3 (19), pp. 88—95. (In Russian).
2. Dobrodeev A. A., Sazonov K. E., Timofeev O. Ya. Global'naya nagruzka na morskije inzhenernye sooruzheniya. Metody opredeleniya. [Global ice loads on marine engineering structures. Approaches to determine]. Nauch.-tekhn. sb. Ros. mor. registra sudokhodstva, 2015, no. 38/39, pp. 61—65. (In Russian).
3. Dobrodeev A. A., Sazonov K. E. Model'nyi eksperiment po opredeleniyu ledovoi nagruzki na morskije inzhenernye sooruzheniya. [Ice model tests with marine structures]. Trudy Kryl. nauch. tsentra, 2019, no. 2 (388), pp. 24—40. (In Russian).
4. Denisov V. I., Sazonov K. E., Timofeev O. Ya. Novye eksperimental'nye vozmozhnosti Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra po izucheniyu ledovykh vozdeistvii na ob'ekty morskoi tekhniki. [New experimental capabilities of the Krylov State Research Center for study of ice impact on marine equipment]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2015, no. 3 (19), pp. 76—81. (In Russian).
5. Borusevich V. O., Rusetskii A. A., Sazonov K. E., Solov'ev I. A. Sovremennye gidrodinamicheskie laboratorii. [The modern hydrodynamic laboratories]. St. Petersburg, FGUP “Krylov. gos. nauch. tsentr”, 2019, 316 p. (In Russian).
6. SP 38.13330.2018 Nagruzki i vozdeistviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov). [SP 38.13330.2018 Loads and interaction with hydro-technical installations (wave and ice loads, loads from ships)]. SNIIP 2.06.04-82*. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/553863434>. (In Russian).
7. Løset S., Shkhinek K. N., Gudmestad O. T., Høyland K. V. Actions from ice on Arctic Offshore and Coastal Structures. Trondheim; St. Petersburg; Moscow; Krasnodar: Publ. “LAN”, 2006, 271 p.
8. Osipenko N. M. O modeli razvitiya navala l'da u pregrady. [About mathematical model of ice encroachment near barrier]. Nauch.-tekhn. sb. “Vesti gazovoi nauki”, 2018, no. 4 (36), pp. 131—138. (In Russian).
9. GOST R 54483-2011 (ISO 19000:2002). Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Platformy morskije dlya neftegazodobychi. Obshchie trebovaniya. [GOST R 54483-2011 (ISO 19000:2002). Petroleum and gas industry. Oil and gas marine platforms. General requirements]. Moscow, Standartinform, 2012. (In Russian).
10. ISO/DIS 19000:2018. Petroleum and natural gas industries. General requirements for offshore structure. Available at: www.iso.org.
11. ISO/DIS 19004-1:2017. Petroleum and natural gas industries. Floating offshore structures. Pt. 1: Ship-shaped, semi-submersible spar and shallow-draught cylindrical structures. Available at: www.iso.org.
12. Blagovidov L. B., Blagovidova I. L., Tertyshnikova A. S. Sravnitel'nyi analiz trebovaniy normativnykh dokumentov k vyboru razmera vertikal'nogo klirensa dlya morskikh statsionarnykh ledostoikikh neftegazovykh platform. [Comparative analysis of regulatory requirements for the vertical clearance definition for offshore gravity ice-resistant oil and gas platforms]. Nauch.-tekhn. sb. Ros. mor. registra sudokhodstva, 2018, no. 52/53, pp. 106—112. (In Russian).
13. Doronin Yu. P., Kubyshkin N. V. Rost i tayanie morskogo l'da. [Growth and melting of sea ice]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2001, 42 p. (In Russian).

14. Karulin E. B., Karulina M. M., Blagovidov L. B. Model'nye issledovaniya vzaimodeistviya so l'dom platformy kessonogo tipa na melkovod'e. [Ice model tests of caisson platform in shallow-water]. Trudy TsNII im. akad. A. N. Krylova, 2007, iss. 34 (318), pp. 5—21. (In Russian).
15. Doronin Yu. P., Kheisin D. E. Morskoi led. [Sea ice]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1975, 318 p. (In Russian).
16. Uiks U. F., Assur A. Razrushenie ozernogo i morskogo l'da. [Breaking of lake and sea ice]. Razrushenie. Pod red. G. Libovitsa. Vol. 7: Razrushenie nemetallov i kompozitnykh materialov. Ch. 1: Neorganicheskie materialy. Moscow, Mir, 1976, pp. 513—623. (In Russian).
17. Zvyagin P., Dobrodeev A., Sazonov K. Ice loads dynamics for model scale cylinders of various diameters. Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 2017.
18. Appolonov E. M., Nesterov A. B., Timofeev O. Ya. Reglamentatsiya ledovykh nagruzok na vertikal'nyi bort pri szhatii vo l'dakh. [Regulation of ice loads on middle part body under ice compression]. Nauch.-tekhn. sb. Ros. mor. registra sudokhodstva, 2008, iss. 31, pp. 129—146. (In Russian).
19. Sazonov K. E., Simakina A. A., Timofeev O. Ya. Izgib ledyanogo polya pod deistviem momenta. [Bending of ice sheet under moment]. Problemy Arktiki i Antarktiki, 2020. In print. (In Russian).
20. Palmer A., Croasdale K. Arctic Offshore Engineering. Singapore, World Scientific Publ., 2013, 357 p.
21. Dobrodeev A. A., Sazonov K. E., Boitsun I. I. Sravnitel'nyi analiz razlichnykh tipov opornykh osnovanii ob'ektov obustroistva mestorozhdenii v Kaspiiskom more. [Comparative analysis of different types of oil marine structure foundations for Caspian Sea]. Trudy Krylov. gos. nauch. tsentra, 2015, iss. 88 (372), pp. 203—210. (In Russian).
22. Alekseev Yu. N., Afanas'ev V. P., Litonov O. E., Mansurov M. N., Truskov P. A. Ledotekhnicheskie aspekty osvoeniya morskikh mestorozhdenii nefti i gaza. [Ice-technical aspects of offshore oil and gas fields development]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2001, 360 p. (In Russian).
23. Vershinin S. A., Truskov P. A., Kuzmichev K. V. Vozdeistvie l'da na sooruzheniya Sakhalinskogo shel'fa. [Ice interaction with marine structures of Sakhalin shelf]. Moscow, In-t Giprostroimost, 2005, 208 p. (In Russian).

Information about the authors

Dobrodeev Aleksei Alekseevich, PhD of Engineering Science, Head of Ice Researching Section, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), e-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru.

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

Bibliographic description

Dobrodeev A. A., Sazonov K. E. Physical modeling of ice load on extended hydraulic constructions. The vertical wall constructions. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 4 (40), pp. 77—89. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-77-89. (In Russian).

© Dobrodeev A. A., Sazonov K. E., 2020