

УДК 551.326.7+629.5.018.13
EDN: FSOMBA

А.А. Добродеев^{1, 2, 3} , Н.Ю. Клементьева¹, К.Е. Сазонов^{1, 2} 

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

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

³ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА СООРУЖЕНИЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СЦЕНАРИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются экспериментальные методы определения ледовой нагрузки от останавливаемой морским гидротехническим сооружением (МГС) льдины. Основная цель – уточнение методик проведения таких экспериментов в ледовом бассейне.

Материалы и методы. Анализ данных модельных экспериментов в ледовом бассейне, выполнение расчетов по математической модели процесса взаимодействия льдины с МГС.

Основные результаты. Выявлены условия, при выполнении которых при анализе результатов эксперимента необходимо учитывать проявление масштабного эффекта сопротивления воды движению льдины. Показано, что усиления, вызывающие дрейф льда, не оказывают влияния на процесс взаимодействия льдины с МГС.

Заключение. Показано, что при определенных условиях на результаты модельного измерения ледовой силы, действующей на МГС, может оказывать заметное влияние масштабный эффект, связанный с различным характером обтекания потоком жидкости тормозящейся льдины. Разработан способ учета масштабного эффекта. Показано, что величина силы, вызывающей дрейф льда, может не учитываться при определении ледовой нагрузки.

Ключевые слова: льдина, дрейф, модельный эксперимент, масштабный эффект, ледовая нагрузка.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 551.326.7+629.5.018.13
EDN: FSOMBA

A.A. Dobrodeev^{1, 2, 3} , N.Yu. Klementieva¹, K.E. Sazonov^{1, 2} 

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

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

³ Peter the Great St. Petersburg State Polytechnical University, St. Petersburg, Russia

METHOD OF EXPERIMENTAL EVALUATION OF ICE LOAD IN LIMITING KINETIC ENERGY SCENARIO

Object and purpose of research. The object of research is experimental methods of determining the ice load from an ice floe checked by a marine hydraulic structure (MHS). The main purpose is to update experimental methods for this kind of tests in the ice basin.

Materials and methods. Analysis of the ice basin model tests and calculations by a mathematical model of ice/MHS interaction.

Для цитирования: Добродеев А.А., Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е. Методика экспериментального определения ледовой нагрузки на сооружение при реализации сценария предельной кинетической энергии. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 4(406): 33–40.

For citations: Dobrodeev A.A., Klementieva N.Yu., Sazonov K.E. Method of experimental evaluation of ice load in limiting kinetic energy scenario. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 4(406): 33–40 (in Russian).

Main results. Conditions are identified when it is required to take into account the scale effect on water resistance to ice floe in the analysis of experimental results. It is shown that forces driving the ice drift do not influence interaction between ice floe and MHS.

Conclusion. It is shown that at certain conditions the ice force on MHS measured on the model may be subject to noticeable scale effect associated with differences in patterns of flow slowing down the ice floe. A method to include the scale effect has been devised. It is shown that the force inducing ice drift can be ignored when the ice load is determined.

Keywords: ice floe, drift, model experiment, scale effect, ice load.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Ледовая нагрузка на морские гидротехнические сооружения определяется в соответствии с тремя основными сценариями воздействия льда на сооружение. К ним относятся сценарий предельного напряжения, сценарий предельной кинетической энергии и сценарий предельной силы [1]. В соответствии с нормативным документом [2] расчеты, соответствующие сценарию предельной кинетической энергии, должны выполняться практически для любого МГС [3]. Этим обстоятельством обусловлен повышенный интерес к указанному сценарию.

Формулы для расчета усилия, действующего на сооружение и возникающего при остановке дрейфующего ледяного поля, в учебных пособиях [1] и нормативных документах [2] получают из рассмотрения уравнения баланса энергии. В соответствии с этим уравнением запасенная дрейфующим ледяным полем кинетическая энергия полностью расходуется при взаимодействии с МГС. Уравнение баланса обычно записывается в следующем виде:

$$\frac{M'V^2}{2} = \int_0^x \sigma_{cr}(A_c)A_c(x)dx, \quad (1)$$

где M' – масса дрейфующей льдины, определенная в общем случае с учетом присоединенных масс воды; V – скорость дрейфа ледяного поля; σ_{cr} – прочность льда на смятие; $A_c(x)$ – зависимость площади контакта льдины с сооружением в зависимости от глубины внедрения x , которая определяется в системе координат, связанной с сооружением.

Для простых в плане форм МГС (круг, прямоугольник, клин), а также в предположении $\sigma_{cr} = \text{const}$ выражение (1) дает возможность получения аналитических выражений для максимального значения действующей силы, которая в соответствии с расчетной схемой возникает в конце процесса внедрения сооружения в лед. Иногда полученные выражения корректируются путем введения эмпирических коэффициентов.

В механике используется два эквивалентных подхода к изучению различных процессов: энергетический и силовой. В практических приложениях, как правило, применяется силовой подход, т.к. в его рамках проще осуществляется учет потерь на трение. В рамках силового подхода задача об остановке дрейфующего поля МГС может быть описана следующим дифференциальным уравнением:

$$M' \frac{d^2x}{dt^2} = F_m - F_w - F_I, \quad (2)$$

$$\text{при начальном условии } x|_{t=0} = 0; \quad \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = V, \quad (3)$$

где F_m , F_w – сила, вызывающая движение ледяного поля, и сила сопротивления воды движению поля соответственно; F_I – ледовая сила, действующая на льдину со стороны МГС.

В данной работе рассматривается возможность изучения ледовой нагрузки при остановке дрейфующего ледяного поля МГС с помощью проведения экспериментов в ледовом бассейне [4]. Необходимость проведения таких экспериментов связана с целым рядом факторов, важнейшими из которых являются существенные отличия формы реальных сооружений в плане от простейших форм, рассмотренных в нормативных документах и учебных пособиях. Кроме этого при выводе расчетных формул вводится ряд весьма сильных допущений, например постоянство ледового давления по площади контакта МГС со льдом. Допустимость использования такого рода допущений может быть оценена только при проведении экспериментальных исследований.

Целями настоящей работы являются подробное рассмотрение модельного эксперимента в ледовом бассейне и определение условий, при которых результаты такого эксперимента могут быть перенесены на натурные условия. Дело в том, что условия проведения модельного эксперимента несколько отличаются от натурального взаимодействия. Основные отличия заключаются в том, что, во-первых, сила сопротивления воды движению льдины под-

вержена масштабному эффекту, а во-вторых, в модельном эксперименте отсутствует сила, вызывающая дрейф льда.

Методика проведения эксперимента в ледовом бассейне

Method of experiments
in the ice basin

Для проведения экспериментов по торможению дрейфующего поля льда в ледовом бассейне может быть использована любая модель МГС, которая является масштабной копией сооружения целиком.

В данной работе в качестве объекта исследований выбран швартовный пал, являющийся частью причала, который входит в состав гидротехнических сооружений нефтеналивного терминала. Указанный терминал расположен в акватории, где ежегодно наблюдаются ледовые условия. Помимо швартовного пала причал включает в себя эстакаду мостового типа, технологические площадки, швартовно-отбойные палы и переходные мостики. Все эти сооружения имеют один конструктивный тип, представляющий собой железобетонный ростверк на свайном основании. Их основным отличием являются размеры элементов причала и, соответственно, количество и расположение свай в каждом из них.

Модель швартовного пала изготовлена с использованием металлоконструкций, в районе ростверка обшита пенопластом повышенной прочности и целиком окрашена в оранжевый цвет для наилучшей визуализации процессов взаимодействия со льдом. Масштаб моделирования выбран 1:17 [5]. Монтаж модели на буксировочной тележке ледового опытового бассейна выполнен с помощью 6-компонентного динамометра. Испытания при определении нагрузки от бесконечного поля проводились по схеме обращенного движения, а при исследовании торможения льдины – по схеме прямого надвигания льда.

Методика эксперимента, основанная на принципе обращенного движения, использована для изучения воздействия на модель МГС бесконечного поля сплошного дрейфующего льда. В этих экспериментах воспринимаемая моделью ледовая нагрузка соответствует сценарию предельных напряжений. В опытовом бассейне осуществляется буксировка модели сооружения в условиях неподвижного ледового поля со скоростью, соответствующей в заданном масштабе скорости движения льда. Такие исследова-



Рис. 1. Эксперимент по торможению льдины моделью морского гидротехнического сооружения
Fig. 1. Experiment of ice floe being checked by marine hydraulic structure

ования позволяют смоделировать различные параметры дрейфа натурального ледового поля и определить максимально возможный уровень глобальной ледовой нагрузки на сооружение.

Методика прямого надвигания льда применена для изучения нагрузки при остановке дрейфующей льдины. Эксперимент выполнялся следующим образом. Буксировочная тележка вместе с моделью сооружения оставалась неподвижной в некоторой точке опытового бассейна. Перед началом эксперимента из неразрушенного участка поля моделированного льда вырезалась прямоугольная льдина, размеры которой были известны. Льдина приводилась в движение с помощью вспомогательной тележки, которая разгоняла ее до заданной скорости. Разгон прекращался менее чем за секунду до начала ее взаимодействия с моделью МГС. После этого льдина продолжала самостоятельное движение по инерции. При взаимодействии льдины с моделью фиксировалось горизонтальное усилие, воспринимаемое моделью, время взаимодействия, проводилась фото- и видеосъемка.

При выполнении эксперимента моделирование осуществлялось по критерию подобия Фруда, в соответствии с которым

$$h_{fs} = \lambda h_{ms}, S_{fs} = \lambda^2 S_{ms}, V_{fs} = \sqrt{\lambda} V_{ms}, F_{fs} = \lambda^3 F_{ms}, \quad (4)$$

где h – толщина льда, S – площадь ледяного поля; V – скорость движения; F – сила взаимодействия, λ – масштаб модели. Индексы fs и ms соответственно относятся к натурному и модельному объектам.

На рис. 1 представлен характерный момент проведения экспериментов по торможению льдины,



Рис. 2. Типичный результат измерения силы взаимодействия останавливавшейся льдины с моделью сооружения

Fig. 2. Typical measurement of interaction force stopping the ice floes against the MHS model

а на рис. 2 – типичные получаемые результаты измерений.

Пересчет модельных данных на натурные условия должен осуществляться в соответствии с выражениями (4). Однако, как указано во введении, имеется два фактора, которые влияют на результаты измерений, а именно наличие масштабного эффекта гидродинамических сил и отсутствие в модельном эксперименте движущей льдину силы. Рассмотрим влияние этих факторов на результаты модельного эксперимента более подробно.

Влияние масштабного эффекта

Scale effect

Масштабный эффект при проведении модельных экспериментов по торможению движущейся льдины выражается в изменении безразмерных коэффициентов сопротивления воды ее движению при переходе от модельных к натурным размерам. Это изменение коэффициентов обусловлено применением в эксперименте частичного, а не полного моделирования.

Необходимость использования частичного моделирования при проведении модельных испытаний связана с невозможностью одновременного удовлетворения требованиям двух основных критериев моделирования, Фруда и Рейнольдса. Нельзя

обеспечить одновременное совпадение для модельного и натурального объектов чисел Фруда $Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}}$

и Рейнольдса $Rn = \frac{VL}{\nu}$, где V – скорость натурального объекта или его модели, L – характерный линейный размер натурального объекта или его модели, g – ускорение свободного падения, ν – кинематическая вязкость воды [6].

Сопротивление воды движению льдины можно представить как сумму двух составляющих: сопротивления «формы» R_0 и сопротивления трения R_F . Волновой составляющей сопротивления из-за малости скорости дрейфа льдины можно пренебречь.

Для дальнейшего рассмотрения сопротивления воды движению льдины введем характерный размер льдины L_I , который определим как

$$L_I = \sqrt{S}, \quad (5)$$

здесь S – площадь льдины.

Сопротивление «формы» может быть рассчитано по следующей формуле:

$$F_{W0} = C_0 \frac{\rho_w V^2}{2} h' L_I, \quad (6)$$

где C_0 – коэффициент сопротивления «формы», который при отрывном обтекании нижней кромки льдины примерно равен 1,15 [6]; $h' = \frac{\rho_I}{\rho_w} h_I$ – за-

глубление льдины в воду; ρ_w , ρ_I – плотности воды и льда соответственно; h_I – толщина льда.

Сопротивление трения задается следующим выражением:

$$F_{WF} = C_F \frac{\rho_w V^2}{2} L_I^2, \quad (7)$$

где C_F – коэффициент сопротивления трения, величина которого зависит от значения числа Рейнольдса, определяющего режим обтекания льдины: ламинарный, переходный или турбулентный.

Для определения величины этого коэффициента воспользуемся подходами, которые применяются при определении характеристик ходкости судов по результатам испытаний их моделей в опытовых бассейнах [7, 8]. Для нахождения коэффициента трения при ламинарном, переходном и турбулентном режимах обтекания Международная конферен-

ция опытовых бассейнов рекомендует использовать следующие выражения:

$$\begin{aligned} Rn < 5,25 \cdot 10^4, C_F &= \frac{1,327}{\sqrt{Rn}}; \\ 5,25 \cdot 10^4 < Rn < 2,0 \cdot 10^6, \\ C_F &= 0,00296 \cdot 10^{0,117(\log_{10} Rn - 6,301)^2}; \\ Rn \geq 2,0 \cdot 10^6, C_F &= \frac{1}{(3,46 \log_{10} Rn - 5,6)^2} - \frac{1700}{Rn}. \end{aligned} \quad (8)$$

При использовании формул (8) число Рейнольдса должно определяться по характерной длине льдины.

Приведенные выше формулы позволяют выполнить оценку влияния масштабного эффекта на результаты испытаний по остановке движущегося ледяного поля моделью МГС. Для выполнения этой оценки воспользуемся математическим описанием процесса с помощью дифференциального уравнения (2). Для простоты рассмотрим случай движения льдины по инерции ($F_m = 0$), который соответствует принятой в правилах классификационных обществ математической модели (1), а также условиям проведения эксперимента в ледовом бассейне.

Основываясь на том, что основной целью модельного эксперимента является определение ледовой нагрузки на сооружение, примем следующую методику оценки влияния масштабного эффекта. Для некоторых заданных натуральных условий (площадь дрейфующего поля льда S , толщина льда h_l , прочность льда на раздробление σ_c и скорость дрейфа V) выполним численное интегрирование уравнения (2). Затем выполним интегрирование этого же уравнения для модельных условий, варьируя масштабный коэффициент λ . Причем расчет при $\lambda = \text{const}$ выполняется для некоторого диапазона модельных скоростей дрейфа льдины. Заданные натурные условия при выполнении расчетов для модельных условий пересчитываются в соответствии с критерием подобия Фруда (4).

Сопоставление результатов расчета для натуральных и модельных условий позволяет определить, при какой модельной скорости дрейфа льда выполняется основное требование моделирования по Фруду $F_{fs} = \lambda^3 F_{ms}$. Выяснение этого вопроса позволит отнести модельные данные к редуцированной скорости и тем самым учесть влияние масштабного эффекта на результаты испытаний.

Ниже в таблице приводятся данные выполненных расчетов. Расчеты выполнялись при варьировании следующих основных факторов, влияющих

на процесс взаимодействия. Рассматривалось изменение масштаба модели от $\lambda = 10$ до $\lambda = 100$. Исследовалось также влияние характерного размера дрейфующего ледяного поля, который менялся в пределах от 100 м до 500 м. В расчетах толщина льда варьировалась от 0,5 до 1,2 м.

Учет влияния движущей силы

Consideration of driving force

Величина движущей силы может быть легко определена на основании расчета сопротивления воды движению льдины. В самом деле, при установившемся движении льдины движущая сила равна сопротивлению воды. Тогда она может быть рассчитана по следующей формуле:

$$F_m = (C_0 h^2 L_l + C_F L_l^2) \frac{\rho_w V^2}{2}. \quad (9)$$

Эта сила постоянна и не изменяет своей величины в процессе взаимодействия льдины и сооружения. После остановки льдины она продолжает действовать на сооружение. Результаты расчетов показали, что величина движущей силы не оказывает никакого влияния на динамику процесса взаимодействия останавливающейся льдины с сооружением.

Обсуждение результатов

Discussion of results

Проанализируем полученные результаты. Первым результатом расчетов было выяснение отсутствия влияния толщины льда на проявление масштабного эффекта (по крайней мере, до толщины 1,2 м). Это обстоятельство объясняется тем, что сопротивление «формы» льдины мало по сравнению с ее сопротивлением трения.

Анализ данных таблицы позволяет выявить влияние других факторов на проявление масштабного эффекта. Так, из таблицы следует, что необходимость учета масштабного эффекта возрастает при увеличении масштаба модели. Если масштаб модели равен $\lambda = 50$ или больше, то этот учет необходим практически в любом случае. Необходимо отметить, что в ледовых бассейнах обычно стараются использовать модели сооружений, изготовленные в меньшем масштабе.

Однако нельзя исключить необходимость исследования протяженных МГС, для испытания которых придется применять указанные масштабы.

Таблица. Результаты расчетов редуцированной скорости
Table. Results of reduced velocity calculations

Масштаб	10					16					20					50					100				
	100	150	300	500		100	150	300	500		100	150	300	500		100	150	300	500		100	150	300	500	
$V = 0,05 \text{ м/с}$	0,059	0,059	0,051	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	0,053	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$V = 0,06 \text{ м/с}$	-	-	-	-	0,134	0,0675	-	-	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$V = 0,07 \text{ м/с}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,11	-	0,07	-	-	-	-	0,136	-	-	-	-	-	-
$V = 0,08 \text{ м/с}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$V = 0,1 \text{ м/с}$	0,109	0,102	0,120	0,1	0,119	0,107	0,102	0,1	0,152	0,116	0,103	0,1	0,103	0,1	-	-	-	0,742	0,125	-	-	-	-	-	-
$V = 0,2 \text{ м/с}$	0,202	0,201	-	-	-	0,203	0,201	0,2	0,216	0,207	0,202	0,2	0,202	0,2	-	-	-	0,231	0,21	-	-	-	-	-	0,378
$V = 0,3 \text{ м/с}$	0,301	-	-	-	0,305	0,302	0,301	0,3	0,301	0,304	0,301	0,3	0,301	0,3	-	-	0,402	0,319	-	-	-	-	-	0,875	0,367
$V = 0,5 \text{ м/с}$	0,501	-	-	-	0,503	0,501	0,501	0,5	0,506	0,503	0,5	0,5	0,503	0,5	0,625	0,549	0,512	0,512	-	-	-	-	-	0,612	0,538
$V = 0,7 \text{ м/с}$	-	-	-	-	0,702	0,701	0,701	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,776	0,732	-	-	-	-	-	-	1,2	0,773	0,73
$V = 1,0 \text{ м/с}$	-	-	-	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,05	1,023	-	-	-	-	-	1,91	1,23	1,05	1,01

Цвета выделены случаи, когда необходимо редуцировать скорость. Они соответствуют 10%-му превышению редуцированной скорости над заданной.

Физический смысл влияния масштаба модели на проявление эффекта вполне ясен. Применение больших масштабов приводит не только к уменьшению размеров модели, но и к снижению скорости дрейфа ледяного поля в соответствии с критериями моделирования. Поэтому в эксперименте обтекание льдины носит преимущественно ламинарный характер. В натуральных же условиях, скорее всего, при этом реализуется переходный режим обтекания.

Данные расчета показывают, что проявление масштабного эффекта усиливается при уменьшении размера дрейфующей льдины и снижении скорости ее дрейфа. Это также связано с преобладающей ролью ламинарного характера обтекания льдины в модельном эксперименте.

При учете масштабного эффекта редуцированную скорость можно вводить двумя способами. Первый способ, который реализован в расчете (табл.), заключается в том, что редуцируется (увеличивается) скорость в модельном эксперименте так, чтобы получаемые в нем значения ледовой силы соответствовали натурным значениям. Такой подход не очень удобен при выполнении модельного эксперимента.

При проведении опытов более удобным является подход, при котором редуцируется натурная скорость дрейфа льда. В этом случае полученный в экспериментах результат приписывается к уменьшенной натурной скорости дрейфа. Расчет по второму способу редуцирования проводится по тому же алгоритму, который изложен в данной статье.

Выводы

Conclusion

В работе рассмотрены некоторые методические особенности по проведению модельного эксперимента в ледовом бассейне при определении ледовой нагрузки на МГС, которая реализуется по сценарию предельной кинетической энергии. Указаны отличия условий проведения модельного эксперимента от того, что наблюдается в натуральных условиях.

Показано, что при определенных условиях на результаты модельного измерения ледовой силы, действующей на МГС, может оказывать заметное влияние масштабный эффект, связанный с различным характером обтекания потоком жидкости тормозящейся льдины. Разработан способ учета масштабного эффекта, основанный на интегрировании уравнения движения льдины при ее взаимодействии с МГС. На базе анализа численного решения этого уравне-

ния определено влияние основных факторов, от которых зависит величина измеряемого усилия. Выявлены диапазоны изменения этих факторов, для которых учет масштабного эффекта необходим. На основе результатов расчетов показано, что величина силы, вызывающей дрейф льда, может не учитываться при определении ледовой нагрузки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00039 «Теоретические основы и прикладные инструменты для создания системы интеллектуального планирования работы флота и поддержки принятия решений в арктическом судоходстве»).

Список использованной литературы

1. Воздействие льда на морские и береговые сооружения / С. Лосет, К.Н. Шкхинец, О. Гудместад, К. Хойланд. Санкт-Петербург : Лань, 2010. 272 с.
2. СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) : актуализир. ред СНиП 2.06.04-82. Москва : Стандартинформ, 2019. IV, 101 с.
3. *Политько В.А., Кантаржи И.Г., Мордвинов К.П.* Ледовые нагрузки на морские гидротехнические сооружения : учебное пособие. Москва : Издательство МГСУ – МИСИ, 2017. 97 с.
4. *Сазонов К.Е.* Модельный и натуральный эксперимент в морской ледотехнике. Санкт-Петербург : ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2021. 306 с.
5. *Добродеев А.А., Сазонов К.Е.* Новый подход к определению ледовой нагрузки на инженерные сооружения для сценария предельной кинетической энергии // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3, Ч. 3. С. 58–64. DOI: 10.37220/МИТ.2023.61.3.044.
6. *Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Туттов И.А.* Справочник по теории корабля. Ходкость и управляемость. Ленинград : Судпромгиз, 1960. 688 с.
7. ITTC : Recommended Procedures and Guidelines : 7.5-02-03-01.3. Podded propulsion tests and extrapolation / Ed. Propulsion Committee of the 28th ITTC. [S.l.], 2017. 21 p.
8. *Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Сазонов К.Е.* Прогнозирование характеристик ходкости многовальных судов. Санкт-Петербург : ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2019. 160 с.

References

1. Actions from Ice on Arctic Offshore and Coastal Structures / S. Loset, K.N. Shkhinec, O. Gudmestad, K. Hoyland. St. Petersburg : Lan publ., 2010. 272 p. (Russian translation).

2. SP38.13330.2018. Loads and forces (induced by waves, ice, and ships) on hydraulic installations: updated ed. SNiP 2.06.04-82. Moscow : Standartinform, 2019. IV, 101 p. (in Russian).
3. Politko V.A., Kantarzhi I.G., Mordvintsev K.P. Ice loads on marine hydraulic installations : education guidance. Moscow : Izd. MGSU-MISI, 2017. 97 p. (in Russian).
4. Sazonov K.E. Model and full-scale experiment in marine ice engineering. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2021. 306 p. (in Russian).
5. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. New approach to determination of ice load on engineering structures in limiting kinetic energy scenario // Marine Intellectual Technologies. 2023. No. 3, Part. 3. P. 58–64. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.04/4 (in Russian).
6. Voitkumsky Ya.I., Pershits R.Ya., Titov I.A. Handbook on ship theory. Propulsion and maneuverability. Leningrad : Sudpromgiz, 1960. 688 p. (in Russian).
7. ITTC : Recommended Procedures and Guidelines : 7.5-02-03-01.3. Podded propulsion tests and extrapolation / Ed. Propulsion Committee of the 28th ITTC. [S.l.], 2017. 21 p.
8. Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Sazonov K.E. Prediction of propulsion performance for multi-shaft vessels. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2019. 160 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Добродеев Алексей Алексеевич, к.т.н., заместитель начальника лаборатории – начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»; старший научный сотрудник ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». Адрес: 196158,

Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-69-78. E-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6305-5090>.

Клементьева Наталья Юрьевна, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-45-23. E-mail: N_Klementieva@ksrc.ru.

Сазонов Кирилл Евгеньевич, д.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; профессор кафедры океанотехники и морских технологий ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: kirsaz@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3364-1309>.

About the authors

Aleksey A. Dobrodeev, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector, Krylov State Research Centre; Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University; Senior Research Scientist of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-69-78. E-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6305-5090>.

Natalya Yu. Klementieva, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-45-23. E-mail: N_Klementieva@ksrc.ru.

Kirill E. Sazonov, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Krylov State Research Centre; Professor of Oceanology and Marine Technologies department, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: kirsaz@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3364-1309>.

Поступила / Received: 19.09.23

Принята в печать / Accepted: 28.11.23

© Добродеев А.А., Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е., 2023