

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-51-58  
УДК 629.5.018:[629.5.021.18:624.042.43]

И.А. Свистунов<sup>1</sup>, В.В. Платонов<sup>2</sup>, В.Н. Тряскин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Россия

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ ЛЕДОВЫХ СЖАТИЯХ НА ПРИМЕРЕ НАУЧНО-ЭКСПЕДИЦИОННОГО СУДНА «АКАДЕМИК ТРЕШНИКОВ»

**Объект и цель научной работы.** Объектом исследования является имитационное моделирование ледовых нагрузок на вертикальный борт судна при ледовых сжатиях.

**Материалы и методы.** Экспериментальные данные по толщине ледяного покрова и температуре его верхних и нижних слоев, полученные в рамках первого этапа проекта Росгидромета «Трансарктика–2019». Математическая модель определения параметров расчетных ледовых нагрузок при сжатии.

**Основные результаты.** Построена имитационная модель для оценки локальных ледовых нагрузок при сжатиях, действующих на суда, которые имеют в средней части вертикальный борт или борт с незначительными углами наклона шпангоутов.

**Заключение.** На примере научно-экспедиционного судна «Академик Трешников» показана возможность оценки и прогнозирования ледовых нагрузок, действующих на бортовые конструкции, при возникновении ледовых сжатий во время эксплуатации ледостойкой самоходной платформы «Северный полюс» или других судов и ледоколов, временно исполняющих роль дрейфующих обсерваторий. Полученными результатами можно руководствоваться при выборе ледяного поля перед дрейфом, гарантируя безаварийность работы корпусных конструкций в условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, ледовое сжатие, предел прочности льда на сжатие, температура слоя ледяного поля, локальные ледовые нагрузки, конструкция ледовых усилений.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-51-58  
UDC 629.5.018:[629.5.021.18:624.042.43]

I. Svistunov<sup>1</sup>, V. Platonov<sup>2</sup>, V. Tryaskin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> St. Petersburg State Marine Technical University, Russia

## SIMULATION OF ICE COMPRESSION LOADS. CASE STUDY: AKADEMIK TRYOSHNIKOV RESEARCH VESSEL

**Object and purpose of research.** This paper discusses ice load simulation for vertical sides of ships compressed by ice.

**Materials and methods.** Experimental data on ice thickness and temperature of upper and lower ice layers obtained under the first stage of Transarktika–2019 project of Russian Federal Service on Hydrometeorology and Environmental Monitoring. A mathematical model for evaluation of design ice compression load parameters.

---

*Для цитирования:* Свистунов И.А., Платонов В.В., Тряскин В.Н. Имитационное моделирование ледовых нагрузок при ледовых сжатиях на примере научно-экспедиционного судна «Академик Трешников». Труды Крыловского государственного научного центра. 2020; 2(392): 51–58.

*For citations:* Svistunov I., Platonov V., Tryaskin V. Simulation of ice compression loads. Case study: Akademik Tryoshnikov research vessel. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; 2(392): 51–58 (in Russian).

**Main results.** This study yielded a simulation model for assessment of local ice compression loads on vessels with small or zero flare angle in the midship area.

**Conclusion.** Taking the experience with Akademik Tryoshnikov research vessel as a case study, this paper demonstrates the possibility of assessing and predicting operational ice compression loads on the sides of Severny Polyus self-propelled ice-resistant platform or other ships temporarily working as drifting observatories. The results of this work could be used to select ice sheet parameters prior to the drift, so as to ensure trouble-free operation of hull structures.

**Keywords:** simulation, ice, ice compression, ultimate compression strength, ice sheet temperature, local ice loads, ice belt structures.

*Authors declare lack of the possible conflicts of interests.*

## Введение

### Introduction

В целях активизации научной и хозяйственной деятельности России в Арктике было принято решение о строительстве первой в мире дрейфующей ледостойкой самоходной платформы [1], призванной выполнять функции долговременной исследовательской базы. Платформа станет альтернативой дрейфующим станциям типа «Северный полюс», работа которых по ряду причин, включая климатические изменения, с 2013 г. была прекращена. Для совершения планового дрейфа платформу предполагается ошвартовывать возле кромки льдины, выбранной для разворачивания ледового лагеря, или заводить внутрь поля с помощью ледокола по проложенному каналу.

Во время дрейфа возможно возникновение периодических ледовых сжатий, которым будут подвергаться корпусные конструкции сооружения, особенно в средней части. Предельная величина и разброс ледовых нагрузок при сжатиях зависят от физико-механических свойств ледяного покрова. Последние в свою очередь определяются параметрами окружающей среды, которые носят явно выраженный вероятностный характер пространственно-временной изменчивости. В связи с этим для прогнозирования фактических ледовых нагрузок целесообразно применять метод имитационного моделирования, основанный на использовании детерминированных расчетных зависимостей в сочетании с данными натурных наблюдений, описываемых вероятностно-статистическими показателями.

В представленной работе реализована имитационная модель ледовых нагрузок от сжатий для научно-экспедиционного судна (НЭС) «Академик Трешников», на базе которого была организована сезонная дрейфующая научно-исследовательская станция «Северный полюс–2019». Дрейф судна выполнялся в рамках проекта Росгидромета «Трансарктика–2019» [2] с целью апробации технологии эксплуатации будущей платформы.

## Физическая картина разрушения ледяного покрова при сжатиях

### Physics of ice compression failure

Рассматривая сжатия судов в массивных дрейфующих льдах, следует выделить два основных механизма разрушения ледяного покрова в районе средней части судна: изгибом от вертикальной составляющей ледовой нагрузки – в случае достаточно большого угла наклона борта; раздроблением кромки льда – в случае малого наклона борта, когда контактные усилия действуют в плоскости ледяного поля.

Критическая величина угла наклона борта к вертикали  $\beta_{\circ}$ , определяющая переход от одного сценария к другому, находится из равенства [3]

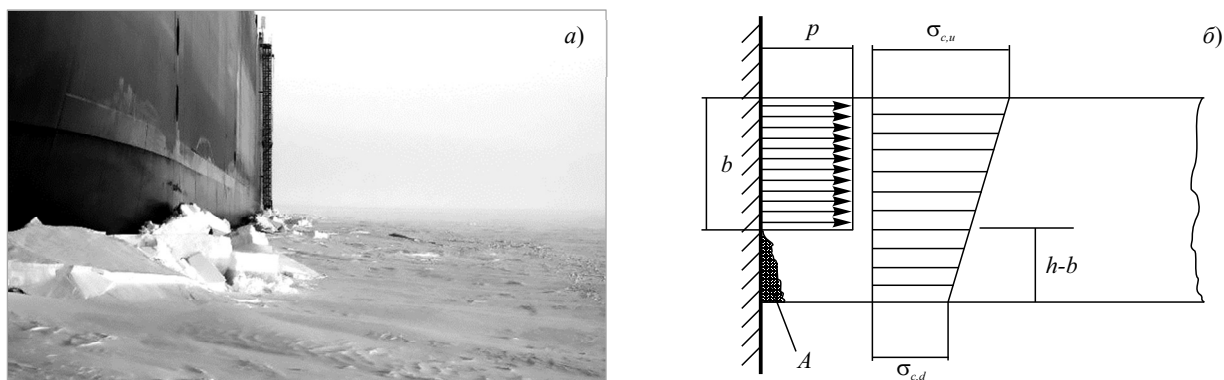
$$\operatorname{tg}\beta_{\circ} = f_{st}, \quad (1)$$

где  $f_{st}$  – коэффициент статического трения льда о корпус.

НЭС «Академик Трешников» в районе цилиндрической вставки имеет углы наклона шпангоута  $\beta_{\circ} = 8^{\circ}$ . При минимальном значении коэффициента статического трения, соответствующем  $f_{st} = 0,14–0,15$  [4], картина разрушения ледяного покрова в средней части данного судна будет соответствовать раздроблению кромки льдины при ее воздействии на вертикальную стенку.

Анализ взаимодействия прямостенного борта с ледяным полем во время сжатий представлен в работе [5]. Согласно натурным наблюдениям, после смятия всех неровностей и незначительных выступов кромки прижимаемого поля наблюдается выламывание относительно небольших секторов изгибом снизу вверх с последующим выдавливанием их на поверхность льда (рис. 1а).

Появление «изгибной» компоненты напряженно-деформированного состояния ледяного поля при сжатии обусловлено анизотропностью льда, и, в частности, изменчивостью физико-механических свойств по толщине. Наряду с соленостью, основным фактором, определяющим изменчивость



**Рис. 1.** Картина разрушения ледяного покрова при взаимодействии с вертикальным бортом (а) и соответствующая схема контактных ледовых нагрузок (б):  $h$  – толщина ровного льда;  $\sigma_{c,u}$  – прочность льда на параллельное сжатие в верхнем слое ровного льда;  $\sigma_{c,d}$  – прочность льда на параллельное сжатие в нижнем слое ровного льда;  $p$  – контактное давление;  $b$  – высота пятна контакта;  $A$  – зона разрушенного льда

**Fig. 1.** Failure pattern of ice interacting with vertical side (a) and corresponding contact ice loads (b):  $h$  – level ice thickness;  $\sigma_{c,u}$  – parallel compression strength of the upper ice level;  $\sigma_{c,d}$  – parallel compression strength of the lower ice level;  $p$  – contact pressure;  $b$  – contact zone height;  $A$  – broken ice zone

прочностных характеристик по горизонтальным слоям, является температура льда. Температура льда на поверхности близка к температуре воздуха, которая обычно существенно ниже температуры нижнего слоя, имеющего значения, сопоставимые с температурой приледного слоя воды. Таким образом, прочность льда на параллельное сжатие также неравномерна по толщине и может быть линейно аппроксимирована, как показано на рис. 1б.

При возникновении интенсивных сжатий происходит контакт кромки ледяного поля по всей толщине с вертикальным бортом судна. Поскольку нижние слои оказываются менее прочными, чем верхние, то при постепенном росте ледовой нагрузки происходит разрушение кристаллов льда нижних горизонтов. Контактное давление естественным образом перераспределяется по высоте, меньшей, чем толщина льда. Дальнейшее увеличение давления при уменьшении высоты пятна контакта приводит к появлению растягивающих напряжений на нижней поверхности ледяного поля, ориентированных в перпендикулярном направлении к плоскости борта. Когда указанные напряжения превышают предел прочности льда на изгиб «снизу», происходит образование поверхностной трещины в нижнем слое ледяной пластины. Со временем трещина распространяется по всей толщине в направлении, перпендикулярном поверхности льда, что в конечном итоге приводит к образованию сектора, который затем вытесняется

наверх. После выламывания одного сектора в контакт вступают соседние зоны кромки, предопределяя образование новых секторов.

Важно отметить, что при взаимодействии кромки поля с бортом форма последнего может значительно различаться. Возможен случай контакта с достаточно ровной кромкой на относительно протяженном участке борта. Также возможен сценарий «точечного» нагружения вдоль плоского борта, возникающий либо после разрушения ровной кромки, либо в случае схождения кромок ледового канала, в котором находится судно. Таким образом, при моделировании требуется учитывать оба реализуемых на практике варианта.

## Функциональные зависимости для определения параметров ледовой нагрузки

### Ice load calculation functions

Для описанной выше физической картины разрушения кромки льда при сжатии построена математическая модель, представленная в [5], которая позволяет определять параметры ледовой нагрузки (контактного давления  $p$ , высоты  $b$  и длины зоны контакта  $l$ ) для двух характерных вариантов ледового сжатия: протяженного контакта кромки ледяного поля вдоль вертикального борта (модель № 1,  $l/h = \text{const}$ ) и «точечного» характера контакта кромки ледяного поля с вертикальным бортом

**Таблица 1.** Расчетные зависимости для описанных моделей

**Table 1.** Calculation formulae for the two models

№	Модель № 1	Модель № 2
1	$\frac{b}{h} = 0,78 - 0,19 \cdot e^{\left(4,77\beta - \frac{\gamma}{1,87 \ln \beta + 4,77}\right)}$	$\frac{l}{h} = 1134 \cdot \left(\frac{\beta}{1,5\gamma + 1}\right)^{2,5}$
2	$p = \left(\gamma - (\gamma - 1) \frac{b}{h}\right) \sigma_{c,d}$	$p = 0,4 \sigma_{c,d} (1,5\gamma + 1)$
3	$b = \left(\frac{b}{h}\right) h$	$b = 0,4h$
4	$l = 2,5h$	$l = \left(\frac{l}{h}\right) h$

(модель № 2,  $b/h = \text{const}$ ). Согласно описанному механизму образования секторов расчетные модели, учитывающие характерные сценарии взаимодействия, представляющие собой функциональные зависимости между параметрами ледовой нагрузки и прочностными свойствами ледяного покрова. Расчетные зависимости для описанных моделей приведены в табл. 1, где  $\sigma_{c,d}$  – прочность льда на параллельное сжатие в нижнем слое ровного льда, МПа;  $\sigma_{c,u}$  – прочность льда на параллельное сжатие в верхнем слое ровного льда, МПа;  $\sigma_{b,d}$  – предел прочности льда на изгиб «снизу», МПа;  $\gamma = \sigma_{c,u} / \sigma_{c,d}$ ;  $\beta = \sigma_{b,d} / \sigma_{c,d}$ .

Для определения предела прочности льда на параллельное сжатие для верхнего и нижнего слоев можно воспользоваться зависимостью от температуры льда этих слоев согласно формуле [5]:

$$\sigma_c = \begin{cases} 0,415|T| + 1,17 & \text{при } T > -10 \text{ }^\circ\text{C} \\ 2,1\sqrt{|T| - 3,59} & \text{при } T < -10 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

где  $T$  – температура льда.

## Процесс имитационного моделирования

### Simulation process

Имитационное моделирование ледовых нагрузок на корпус судна от сжатия состоит в комбинации расчетного алгоритма определения параметров ледовых нагрузок при сжатии и генераторов псевдослучайных чисел. Цель метода – в подборе теоретических законов распределения, адекватно аппроксимирующих эмпирические гистограммы случайных параметров ледовых нагрузок. Процесс имитацион-

ного моделирования в настоящем случае включает следующие этапы:

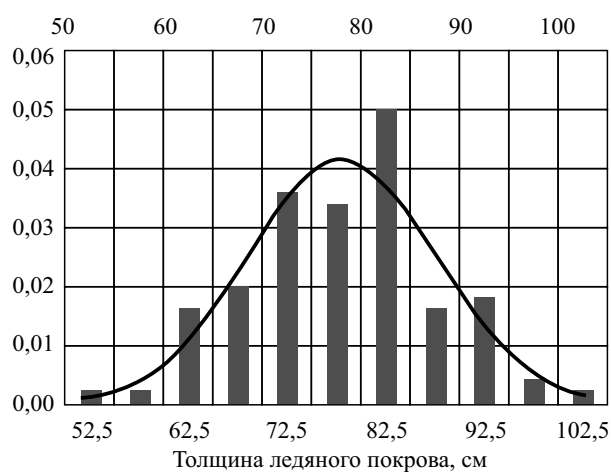
- подготовка исходных данных по интересующему району дрейфа (результаты замеров толщины ледяного покрова и температуры его верхних и нижних слоев). Оценка типа законов распределения исходных параметров;
- моделирование толщины ледяного покрова и температуры его верхних и нижних слоев с использованием генераторов псевдослучайных чисел;
- определение параметров ледовых нагрузок от сжатия по расчетным зависимостям математических моделей для заданного набора сгенерированных параметров ледяного покрова;
- группировка (построение статистических законов распределения) и обработка результатов моделирования методами математической статистики;
- построение теоретических законов распределения для параметров ледовой нагрузки на корпус судна при ледовых сжатиях;
- проверка согласования теоретического и статистического распределения методами проверки правдоподобия гипотез с использованием критериев согласия Колмогорова и Пирсона;
- определение обеспеченности расчетных предельных нагрузок при заданных параметрах конструкций корпуса в районе цилиндрической вставки применительно к построенным теоретическим законам распределения действующих нагрузок при ледовых сжатиях.

В качестве исходной информации по толщине ледяного покрова и температуре его верхних и нижних слоев выбраны данные, полученные в ходе дрейфа НЭС «Академик Трешников», который

**Таблица 2.** Параметры льда

**Table 2.** Ice parameters

Характеристика	Толщина льда, см	Температура льда		Прочность льда на изгиб, МПа
		верхний слой, °С	нижний слой, °С	
Среднее	77,0	-6,1	-2,2	0,32
Среднеквадратичное отклонение	9,4	1,5	0,2	0,07
Дисперсия	88	2,4	0,05	0,005



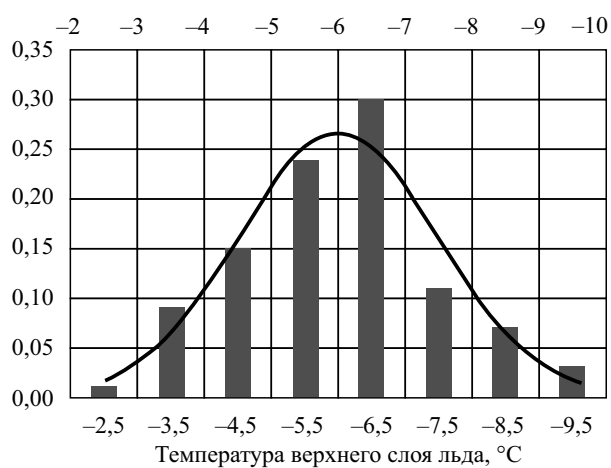
**Рис. 2.** Гистограмма распределения толщин ледяного покрова

**Fig. 2.** Histogram of ice thickness distribution

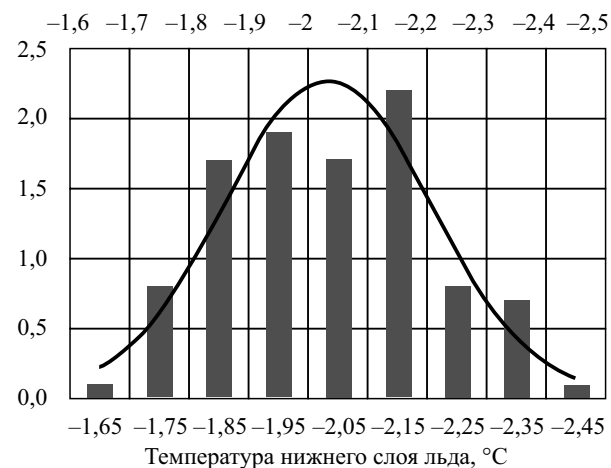


**Рис. 3.** Гистограмма распределения прочности льда на изгиб

**Fig. 3.** Histogram of ice flexural strength distribution



*a)*



*б)*

**Рис. 4.** Гистограммы распределения температур льда верхнего (а) и нижнего (б) слоев

**Fig. 4.** Histograms of ice temperature distribution in upper (a) and lower (b) layers

начался в районе к северу от архипелага Земля Франца-Иосифа в конце марта 2019 г. Ледоисследовательские работы на льдине, в которую было встроено судно, проводились в период 1–28 апреля. Полученные данные были обработаны и аппроксимированы нормальным законом распределения с параметрами, приведенными в табл. 2.

С использованием генераторов псевдослучайных чисел для нормального закона распределения с полученными параметрами построены гистограммы распределения для толщины ледяного покрова (рис. 2), изгибной прочности (рис. 3), температур верхнего (рис. 4а) и нижнего (рис. 4б) слоев.

## Результаты имитационного моделирования

### Simulation results

По описанным выше математическим моделям для сгенерированных исходных данных по параметрам ледяного покрова были смоделированы ледовые нагрузки на бортовые перекрытия НЭС «Академик Трешников», которые могут возникнуть во время дрейфа при ледовых сжатиях. Результаты моделирования ледового давления, высоты зоны контакта и погонной нагрузки представлены в виде гистограмм парциальных распределений на рис. 5–10 (см. вклейку) соответственно, где также приведены аппроксимирующие их теоретические законы: нормальный закон (закон Гаусса), гамма-распределение и распределение Вейбулла [6, 7].

Вопрос согласования теоретического и статистического распределения решается методами проверки правдоподобия гипотез с использованием двух критериев согласия: критерия  $\chi^2$  (Пирсона) и критерия Колмогорова [8]. По критерию согласия  $\chi^2$  определяется критериальная статистика  $T$  и находится критическое значение критерия  $t_{кр}$  – квантиль порядка  $(1-\alpha)$  распределения  $\chi^2$  с  $(k-1)$  степенью свободы. Гипотеза принимается, если  $T \leq t_{кр}$ . В противном случае гипотеза отклоняется. В качестве меры расхождения между статистическим и теоретическим распределениями А.Н. Колмогоров рассматривает максимальное значение модуля разности между статистической функцией распределения  $F^*(x)$  и соответствующей теоретической функцией распределения. Для теоретических распределений, представленных на рис. 5, 7, 9, наиболее подходящими являются нормальный закон, гамма-распределение и распределение Вей-

булла, что подтверждается критериями согласия Колмогорова и Пирсона.

Для расчетных предельных нагрузок, определенных с использованием требований Правил РМРС [9] при заданных параметрах конструкций корпуса в районе цилиндрической вставки НЭС «Академик Трешников», была оценена обеспеченность (вероятность превышения) контактного давления (определяющего в большей степени прочность обшивки) и погонной нагрузки (определяющей в большей степени прочность набора). Как показали результаты расчета, вероятность повреждения наружной обшивки НЭС «Академик Трешников» для нового судна в рассматриваемых ледовых условиях пренебрежимо мала и быстро возрастает по мере износа наружной обшивки. Так, при 50 %-ном износе вероятность повреждения обшивки увеличивается до 5–6 %; при уменьшении толщины обшивки на величину добавки на износ, нормируемую Правилами РМРС, вероятность повреждения достигает 10 %. Вероятность повреждения бортового набора в районе ледовых усилений (обеспеченность предельной погонной нагрузки) в рассматриваемых ледовых условиях пренебрежимо мала даже при полном нормативном износе конструкций по состоянию на конец срока службы судна.

## Заключение

### Conclusion

В работе представлена имитационная модель для оценки локальных ледовых нагрузок при сжатиях, действующих на суда, которые имеют в средней части вертикальный борт или борт с незначительными углами наклона шпангоутов. В основе стохастического моделирования лежат функциональные зависимости, описывающие механизм разрушения кромки ледяного поля при статическом взаимодействии с вертикальной стенкой с учетом неравномерности прочности льда на параллельное сжатие по толщине. Модель реализована применительно к НЭС «Академик Трешников», совершившему плановый дрейф в качестве базы для дрейфующей станции «Северный полюс–2019». В ходе рейса были получены уникальные данные о характеристиках ледяного покрова в районе дрейфа, которые легли в основу имитационной модели.

Данный подход может быть реализован во время эксплуатации ледостойкой самоходной платформы «Северный полюс» или других судов и ледоколов, временно исполняющих роль дрейфую-

щих обсерваторий, для оценки и прогнозирования ледовых нагрузок, действующих на бортовые конструкции при возникновении ледовых сжатий. Результаты имитационного моделирования также можно руководствоваться перед дрейфом при выборе ледяного поля, гарантируя таким образом безаварийность работы корпусных конструкций в условиях эксплуатации.

Стоит добавить, что определение ледовых нагрузок при сжатиях в такой постановке следует проводить и на стадии проектирования набора ледового пояса в средней части судна ледового плавания.

Материалы, используемые для данной публикации, получены в рамках первого этапа проекта Росгидромета «Трансарктика–2019».

## Библиографический список

1. Perspectives of using a drifting ice-resistant platform of the “North Pole” type, which is under construction, as a multifunctional research complex in the Arctic [Electron. resource] / *Makarov A.S.* [et al.] // Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Delft, 2019. URL: <http://www.poac.com/Papers/2019/pdf/POAC19-123.pdf> (accessed: 21.01.2020).
2. Transarktika–2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V “Akademik Tryoshnikov” / *Frolov I.E.* [et al.] // Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2019. 65. 3. P. 255–274.
3. *Хейсин Д.Е.* Определение ледовых нагрузок, действующих на корпус судна, плавающего во льдах: Дис. ... канд. техн. наук. Ленинград: Ленинградский кораблестроительный институт, 1962. 168 с.
4. *Рывлин А.Я.* Экспериментальное изучение трения льда // Труды ААНИИ. 1973. Т. 309. С. 186–199.
5. *Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Тимофеев О.Я.* Регламентация ледовых нагрузок на вертикальный борт при сжатии во льдах // Научно-технический сборник Российского Морского Регистра Судоходства. 2008. Вып. 31. С. 129–146.
6. *Екимов В.В.* Вероятностные методы в строительной механике корабля. Ленинград: Судостроение, 1966. 328 с.
7. *Хастингс Н., Пикок Дж.* Справочник по статистическим распределениям. Москва: Статистика, 1980. 95 с.
8. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. Москва: Высшая школа, 1999. 576 с.
9. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. Санкт-Петербург: Российский морской регистр судоходства, 2019.

## References

1. Perspectives of using a drifting ice-resistant platform of the “North Pole” type, which is under construction, as a multifunctional research complex in the Arctic [Electron. resource] / *Makarov A.S.* [et al.] // Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Delft, 2019. URL: <http://www.poac.com/Papers/2019/pdf/POAC19-123.pdf> (accessed: 21.01.2020).
2. Transarktika–2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V “Akademik Tryoshnikov” / *I.E. Frolov* [et al.] // Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2019. 65. 3. P. 255–274.
3. *D. Kheisin.* Ice load calculations for ice-going hulls. Cand. Sci. (Eng.) Thesis. Leningrad: Leningrad Shipbuilding Institute, 1962. 168 p. (*in Russian*).
4. *A. Ryvlin.* Experimental Study of Ice Friction // Transactions of AARI. 1973. Vol. 309. P. 186–199 (*in Russian*).
5. *Ye. Appolonov, A. Nesterov, O. Timofeyev.* Ice load assignment for vertical side under ice compression // RS Research Bulletin. 2008. Issue 31. P. 129–146 (*in Russian*).
6. *V. Yekimov.* Probabilistic methods in naval structural mechanics. Leningrad: Sudostroyeniye, 1966. 328 p. (*in Russian*).
7. *N. Hastings, B. Peacock.* Statistical distributions. Reference book. Moscow: Statistika, 1980. 95 p. (*Russian translation*).
8. *E. Ventsel.* Probability Theory. Moscow: Vysshaya Shkola, 1999. 576 p. (*in Russian*).
9. Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II. Hull. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2019 (*in Russian*).

## Сведения об авторах

*Свистунов Иван Андреевич*, младший научный сотрудник ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт». Адрес: 199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38. Тел.: +7 (812) 352-12-23. E-mail: [svistunoff.ivan@yandex.ru](mailto:svistunoff.ivan@yandex.ru).

*Платонов Виктор Викторович*, к.ф.-м.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: +7 (812) 723-66-07. E-mail: [viktorplatonov@yandex.ru](mailto:viktorplatonov@yandex.ru).

*Тряскин Владимир Николаевич*, д.т.н., заведующий кафедрой конструкции и технической эксплуатации судов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государст-

венный морской технический университет». Адрес:  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3. Тел.:  
+7 (812) 495-26-48. E-mail: tryaskin.vn@yandex.ru.

#### **About the authors**

*Ivan A. Svistunov*, Junior Researcher, Arctic and Antarctic  
Research Institute. Address: 38, Beringa st., St. Petersburg,  
Russia, post code 199397. Tel.: +7 (812) 352-12-23. E-mail:  
svistunoff.ivan@yandex.ru.

*Victor V. Platonov*, Cand. Sci. (Phys. & Math.), Head  
of Sector, Krylov State Research Centre. Address:  
Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia.  
Tel.: +7 (812) 415-45-73. E-mail: vv\_platonov@ksrc.ru.

*Vladimir N. Tryaskin*, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head  
of Department on ship structure and operation, State  
Marine Technical University of St. Petersburg. Address:  
ul. Lotsmanskaya 3, St. Petersburg, 190008, Russia. Tel.:  
+7 (812) 714-09-54. E-mail: tryaskin.vn@yandex.ru.

Поступила / Received: 14.01.20  
Принята в печать / Accepted: 02.06.20  
© Коллектив авторов, 2020