

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-89-98
УДК 629.5.015.4+629.5.021.18
EDN: WIOQHD

В.В. Якимов, П.Ю. Глебко

АО «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота», Санкт-Петербург, Россия

ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПО ДЛИНЕ КОРПУСА ПРИ ДВИЖЕНИИ СУДНА ВО ЛЬДАХ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является водоизмещающее судно, осуществляющее движение во льдах. Цель заключается в изучении основных аспектов, касающихся вероятностного моделирования распределения ударных импульсов по длине корпуса при движении судна во льдах, которое составляет неотъемлемую процедуру единого процесса моделирования случайных нагрузок от воздействия льда на корпус судна.

Материалы и методы. При выполнении исследования для вероятностного моделирования распределения ударных импульсов по длине корпуса при движении судна во льдах использован методический прием, предусматривающий комбинацию вероятностного и имитационного алгоритмов и учитывающий данные натурных наблюдений и испытаний.

Основные результаты. Выполнены краткий обзор и причинно-следственный анализ результатов соответствующих экспериментальных исследований. Представлены и дополнены базовые теоретические положения ранее предложенного метода моделирования случайного распределения числа ударов по длине корпуса при динамическом взаимодействии судна с ледяным покровом. Уделено преимущественное внимание практической реализации указанного метода моделирования на примере арктического челночного танкера двойного действия «Василий Динков».

Заключение. Сделан вывод о том, что использование сформулированного метода вероятностного моделирования распределения ударных импульсов по длине корпуса при движении судна во льдах в рамках решения задач оценки и прогнозирования ледовых нагрузок на суда в вероятностной постановке является обоснованным.

Ключевые слова: корпус судна, движение во льдах, ударный импульс, вероятностное моделирование, случайная величина, эмпирическое распределение, форма ватерлинии.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-89-98
UDC 629.5.015.4+629.5.021.18
EDN: WIOQHD

V.V. Yakimov, P.Yu. Glebko

Central Marine Research and Design Institute, St. Petersburg, Russia

PROBABILISTIC SIMULATION OF IMPACT IMPULSES DISTRIBUTION OVER THE HULL LENGTH DURING THE SHIP MOTION IN ICE

Object and purpose of research. This paper deals with a displacement-type ship moving in ice in order to study the main aspects concerning probabilistic simulation of impact impulses distribution over the hull length during the ship motion in ice, which is an integral procedure of the single process of modeling stochastic ice-induced loads acting on ship hull.

Materials and methods. For probabilistic simulation of impact impulses distribution over the hull length during the ship motion in ice, a methodological technique is applied, providing a combination of probabilistic and simulation algorithms and taking into account the data of full-scale observations and trials.

Main results. A brief review and a causal analysis of the results of appropriate experimental studies are performed. Fundamentals of the previously proposed method for simulating the random distribution of the number of impacts over the hull

Для цитирования: Якимов В.В., Глебко П.Ю. Вероятностное моделирование распределения ударных импульсов по длине корпуса при движении судна во льдах. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 3(405): 89–98.

For citations: Yakimov V.V., Glebko P.Yu. Probabilistic simulation of impact impulses distribution over the hull length during the ship motion in ice. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 3(405): 89–98 (in Russian).

length under dynamic interaction of a ship with an ice cover are presented and supplemented. Primary attention is paid to the practical implementation of the specified simulation method through the example of the double-acting Arctic shuttle tanker "Vasily Dinkov".

Conclusion. The conclusion is drawn that the use of the formulated method for probabilistic simulation of impact impulses distribution over the hull length during the ship motion in ice is substantiated when solving the problems of assessing and forecasting ice-induced loads on ships in a probabilistic definition.

Keywords: ship hull, motion in ice, impact impulse, probabilistic simulation, random variable, empirical distribution, waterline form.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Известно, что реальные процессы взаимодействия объектов морской инфраструктуры с внешней средой, в т.ч. с ледяным покровом, носят явно выраженный стохастический характер, и их отличительной особенностью является наличие значительного числа различных случайных компонент, непосредственно влияющих на величину выходных параметров взаимодействия. Вследствие этого представляется целесообразным переход от детерминированных способов определения рассматриваемых параметров к соответствующим вероятностным оценкам.

Для решения задачи воспроизведения нагрузок от воздействия льда на корпус судна с учетом их стохастической природы отечественными специалистами разработан оригинальный метод моделирования на основе комбинации вероятностного и имитационного алгоритмов. Развернутое описание вопросов, связанных с определением концепции, обзором исследований, разработкой метода и реализацией решения, дано в работах [1, 2].

Согласно предложенному подходу, в общем случае процесс моделирования случайных нагрузок от воздействия льда на корпус судна декомпозируется и представляется в виде последовательности взаимосвязанных процедур, которые могут быть объединены в ряд укрупненных функциональных блоков. Вероятностное моделирование распределения ударных импульсов по длине корпуса при движении судна во льдах составляет неотъемлемую процедуру единого процесса моделирования [3].

Базовые теоретические положения метода моделирования случайного распределения числа ударов по длине корпуса при динамическом взаимодействии судна с ледяным покровом приведены в работе [4]. В значительной степени они сформулированы на основе анализа и обобщения данных натурных наблюдений и испытаний, описанных в работе [5].

В то же время в открытых источниках авторам не удалось обнаружить в явном виде результаты непосредственно прикладного использования мето-

да вероятностного моделирования распределения ударных импульсов по длине корпуса при движении судна во льдах. Чтобы восполнить информационный пробел, при выполнении исследования преимущественное внимание уделено его практической реализации на примере конкретного судна.

В качестве расчетного судна принят арктический челночный танкер двойного действия «Василий Динков». Применительно к нему с использованием указанного метода моделирования получены случайные распределения числа ударов по длине носового (при прямолинейном движении во льдах носом вперед) и кормового (при прямолинейном движении во льдах кормой вперед) заострений корпуса на уровне действующей ватерлинии.

Результаты экспериментальных исследований

Experimental data

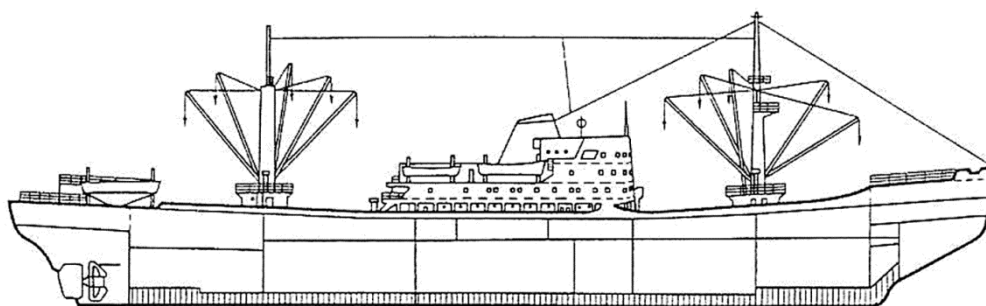
Движение судна во льдах неизбежно сопровождается его динамическим (ударным) взаимодействием с ледяным покровом. В соответствии с работой [6] такое взаимодействие следует рассматривать в контексте задачи теоретической механики о косом внецентренном соударении двух тел – поступательно движущегося судна и неподвижного ледяного покрова.

Данные натурных наблюдений и испытаний показали, что фактическая средняя продолжительность удара корпусом о кромку льда $\bar{\tau}$ оказывается существенно меньше любого из периодов собственных колебаний (качки) судна и составляет порядка 0,5–1,0 с в зависимости от типа ледовых условий и скорости хода судна во льдах [5]. Таким образом, перемещения судна и ледяного покрова за время удара будут крайне незначительными, вследствие чего допускается принимать во внимание только происходящее изменение (перераспределение) скоростей соударяющихся тел. Кроме того, ввиду малости величины τ приемлемо пренебречь действием неударных сил за время удара.

Усилия, возникающие в зоне динамического контакта корпуса со льдом, определяются количе-

Рис. 1. Боковой вид ледокольно-транспортного судна типа «Амгуэма»

Fig. 1. Amguema-class icebreaking transport vessel: side view



ством движения, которое теряет судно в процессе удара. С учетом принятых допущений для описания ударного импульса как меры механического взаимодействия тел при динамическом контакте можно использовать классическую теорию удара, считая его мгновенным:

$$\bar{S} = \int_0^{\tau} P dt. \quad (1)$$

В натуральных условиях выполнение систематических экспериментальных исследований распределения ударных импульсов по длине корпуса при движении судна во льдах стало возможным благодаря переходу к взаимно перпендикулярному расположению групп тензометрических датчиков на элементах бортовых конструкций (схема «крестом» [7]) и применению регистрирующей аппаратуры, позволяющей синхронно записывать показания значительного числа сенсоров. Первые наиболее полные данные по результатам соответствующих экспериментальных исследований получены для транспортных судов ледового плавания постройки 1960-х гг. типа «Амгуэма», «Пове́нец», «Пионер» и «Беломорсклес». Боковой вид ледокольно-транспортного судна типа «Амгуэма» представлен на рис. 1.

На рис. 2 приведены экспериментальные кривые распределения числа ударных импульсов по длине носового заострения корпуса на уровне действующей ватерлинии при плавании судна типа «Амгуэма» в различных ледовых условиях: в крупномелкобитых льдах сплоченностью 6–8 баллов (кривая 1), в обломках дрейфующих ледяных полей (кривая 2), в морских и речных ровных припайных льдах толщиной 40–50 см (кривые 3 и 4). По оси ординат нанесено число ударов, зафиксированных в ходе проведения испытаний тензометрическими датчиками, место расположения которых по длине корпуса относительно практических шпангоутов указано по оси абсцисс [5].

Анализ экспериментальных кривых распределения числа ударных импульсов, приведенных на рис. 2, показывает, что все они, независимо от типа ледовых условий (раздробленности ледяного покрова), имеют идентичный характер. Так, максимальное число ударных импульсов отмечается в районе 21–27 шп., далее оно резко уменьшается, но в районе начала второго грузового трюма (33–35 шп.) снова происходит некоторое увеличение.

Наблюдения на борту за процессами деформирования и разрушения ледяного покрова позволили установить, что судно типа «Амгуэма», двигаясь в ровных сплошных льдах толщиной до 30 см, обламывает носовой оконечностью по 3–4 удлинненных ледовых сектора. С ростом толщины льда количество обламываемых секторов уменьшается до 2–3, при этом их линейные размеры увеличиваются.

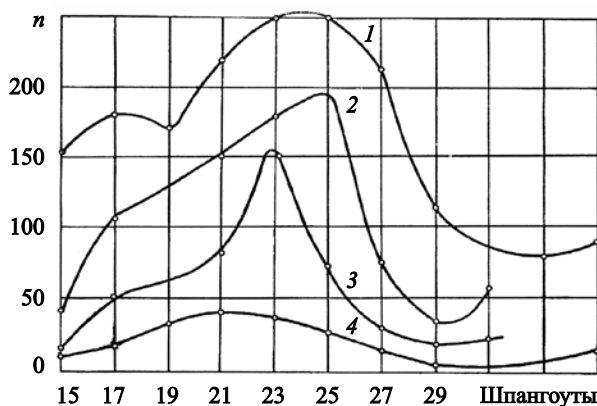


Рис. 2. Распределение числа ударов по длине носового заострения корпуса при плавании судна типа «Амгуэма» в различных ледовых условиях: 1 – в крупномелкобитых льдах; 2 – в обломках дрейфующих ледяных полей; 3 – в морских припайных льдах; 4 – в речных припайных льдах

Fig. 2. Distribution of the number of impacts over the forebody entrance length during the Amguema-class vessel motion in different ice conditions: 1 – broken ice; 2 – fragments of drifting ice fields; 3 – fast sea ice; 4 – fast river ice

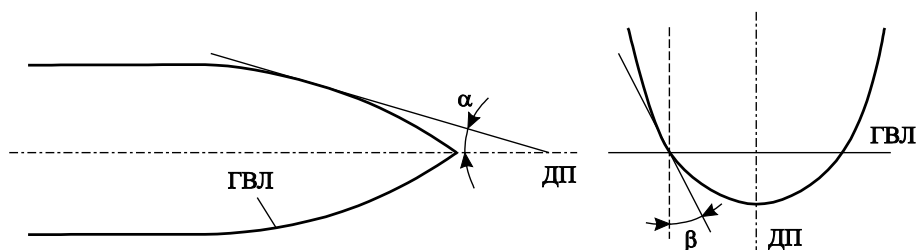


Рис. 3. Измерение углов наклона α (слева) и β (справа)

Fig. 3. Measurement of inclination angles α (left) and β (right)

Ломка предпоследнего ледового сектора реализуется в районе 23–27 шп., который соответствует максимуму кривых 2, 3 и 4 на рис. 2. Последний ледовый сектор обламывается в районе начала второго грузового трюма (33–35 шп.), где отмечается повторное увеличение числа ударных импульсов. В районе 27–33 шп. локализуется граница ломки ледовых секторов, чем в определенной степени можно объяснить уменьшение числа ударов в указанном районе по длине корпуса.

Форму кривой 1 на рис. 2, полученной при движении судна типа «Амгуэма» в крупномелкобитых льдах сплоченностью 6–8 баллов, можно интерпретировать следующим образом. Справедливо полагать, что крупномелкобитый лед распределяется на поверхности воды в пределах трассы плавания судна равномерно. Поэтому число ударов, приходящихся на единицу длины носового заострения корпуса, будет пропорциональным в каждом сечении на уровне действующей ватерлинии величине $\sin \alpha$, где α – угол наклона ватерлинии к диаметральной плоскости судна.

В таком случае при однократном ударе каждой льдины кривые распределения числа ударных импульсов будут плавно убывать по мере удаления от носовой оконечности к миделю судна. При движении судна в разреженных битых льдах в динамический контакт с дрейфующими льдинами сначала вступает участок корпуса, непосредственно примыкающий к форштевню. В результате ударного взаимодействия часть льдин отбрасывается на некоторое расстояние, после чего отдельные из них повторно вступают в контакт с бортом судна. Таким образом, по длине носового заострения корпуса вплоть до начала цилиндрической вставки образуются зоны повышенной и пониженной плотности ударов, соответствующие чередующимся максимумам и минимумам кривых распределения числа ударных импульсов.

На основе анализа экспериментальных кривых распределения числа ударных импульсов по длине носового заострения корпуса на уровне действующей ватерлинии при плавании судна типа «Амгуэма» в различных ледовых условиях можно заключить, что

определяющее влияние на распределение числа ударных импульсов оказывает форма обводов корпуса судна. Аналогичный вывод имеет место также в результате анализа распределения относительных частот попадания установленного числа ударов на единицу длины носового заострения корпуса [5].

В рассматриваемом контексте следует отметить, что форма обводов корпуса судна характеризуется в каждом сечении на уровне действующей ватерлинии следующими основными параметрами и их соотношениями:

- α – угол наклона касательной, проведенной к ватерлинии в точке удара, к диаметральной плоскости судна;
- β – угол наклона касательной, проведенной к шпангоуту в точке удара, к диаметральной плоскости судна.

Измерение параметров формы корпуса судна – углов наклона α и β – выполняется согласно требованиям подпункта 3.10.1.2 «Требования к форме корпуса» части II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства [8], как показано на рис. 3.

Теоретические положения метода моделирования

Theoretical provisions of simulation method

Данные натурных наблюдений и испытаний показали, что положение точки динамического контакта корпуса со льдом является случайным, а вероятность нахождения ледяного покрова в любом сечении между диаметральной плоскостью и полушириной судна оказывается одинаковой.

Таким образом, если бы судно не вносило искажений в исходное состояние ледяного покрова, считалось бы справедливым его равномерное распределение по ширине корпуса, а плотность распределения числа ударов по длине корпуса была бы пропорциональной величине $\sin \alpha$, где α – угол наклона ватерлинии к диаметральной плоскости судна. Однако фактически в процессе динамического взаимодействия судна с ледяным покровом рас-

пределение числа ударов по длине корпуса трансформируется и становится более сложным.

В ходе проведения систематических тензометрических испытаний установлено, что ключевым фактором, определяющим характер распределения ударных импульсов по длине корпуса при прямолинейном поступательном движении судна во льдах, является форма действующей ватерлинии, при этом изменение типа ледовых условий и скорости хода судна во льдах не оказывает существенного влияния. Кроме того, согласно результатам экспериментальных исследований, максимум плотности распределения числа ударов приходится на участок корпуса, где имеет место максимум кривизны ватерлинии, причем наиболее отчетливо выраженное число ударов наблюдается в случае, когда кривизна ватерлинии изменяется наиболее интенсивно [5].

Кривизна действующей ватерлинии вычисляется по следующей общей формуле:

$$k = \left| \frac{d^2 y}{dx^2} \right| \cdot \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{-3/2}, \quad (2)$$

где $y = f(x)$ – уравнение действующей ватерлинии, соответствующей расчетной осадке судна.

При выполнении исследования для вероятностного моделирования распределения ударных импульсов по длине корпуса при движении судна во льдах использован нетривиальный методический прием, ранее предложенный в работе [4]. Его суть заключается в следующем. Чтобы получить достаточно близкое к действительному распределение числа ударов по длине корпуса, следует ввести некоторое фиктивное распределение точек контакта по ширине корпуса, которое обуславливало бы распределение числа ударов по длине корпуса, соответствующее эмпирическому распределению.

Если указанное фиктивное распределение заменить трапецией, ординату которой b при этом подобрать таким образом, чтобы координата максимума плотности распределения числа ударов совпадала по длине корпуса с координатой максимума кривизны ватерлинии, моделирование координаты точки контакта по ширине корпуса можно осуществить с использованием стандартного генератора псевдослучайных чисел:

$$\bar{y}(u) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{b}{1-b} + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \frac{b^2}{(1-b)^2} + \frac{u}{1-b}}, \quad (3)$$

где $\bar{y} = y/(B_{wl}/2)$ – безразмерная линейная координата, определяющая положение точки контакта

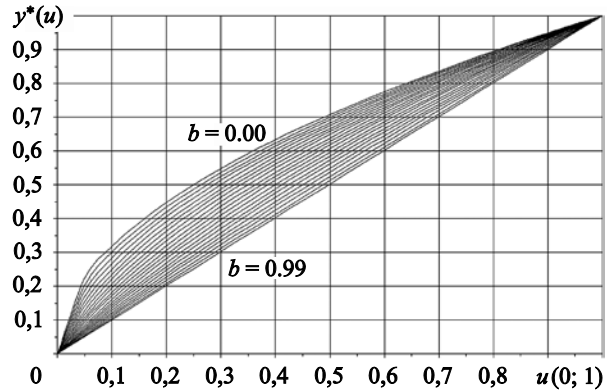


Рис. 4. Функциональная зависимость $\bar{y} = f(u)$ при различных значениях параметра b

Fig. 4. Function $\bar{y} = f(u)$ for different values of b parameter

корпуса со льдом в поперечном направлении относительно диаметральной плоскости судна и соответствующая полуширине действующей ватерлинии; B_{wl} – ширина судна по действующей ватерлинии; u – случайное число, равномерно распределенное в интервале $(0, 1)$; b – безразмерный числовой параметр.

На рис. 4 приведено графическое отображение функциональной зависимости $\bar{y} = f(u)$ при различных значениях параметра b . В качестве релевантного диапазона изменения значений параметра b следует принимать полуинтервал $[0, 1)$. Если параметр $b = 0$, величина $\bar{y}(u) = \sqrt{u}$. Если параметр $b \rightarrow 1$, величина $\bar{y}(u) \rightarrow u$. Если параметр $b > 1$, величина $\bar{y}(u)$ при всех возможных значениях случайного числа u принимает значения, превышающие 1, что противоречит базовому условию $0 \leq \bar{y}(u) \leq 1$.

Если параметр $b < 0$, величина $\bar{y}(u)$ при нулевом значении случайного числа u принимает значения, отличные от 0, причем с уменьшением значений параметра b диапазон изменения значений величины $\bar{y}(u)$ сокращается за счет увеличения нижних граничных значений. Вследствие этого при моделировании случайного распределения числа ударов по длине корпуса из рассмотрения исключается часть сечений на уровне действующей ватерлинии.

Чтобы перейти к искомому распределению числа ударов по длине корпуса, следует с использованием заданного уравнения действующей ватерлинии $y = f(x)$ по полученным случайным значениям безразмерной линейной координаты $\bar{y}(u)$ вычислить случайные значения размерной линейной координаты $x(y)$, определяющей положение точки контакта корпуса со льдом в продольном направлении.

нии, и после сгруппировать их относительно принятых расчетных сечений на уровне действующей ватерлинии (например, целых теоретических шпангоутов и их долей).

Практическая реализация метода моделирования

Practical implementation of simulation method

В качестве расчетного судна принят арктический челночный танкер двойного действия «Василий Динков», построенный на верфи Geoje Shipyard компании Samsung Heavy Industries Co. Ltd. (Южная Корея) и введенный в эксплуатацию в декабре 2007 г. Судно дедвейтом около 70 000 т и пропульсивной мощностью порядка 20 МВт имеет ледовый класс Российского морского регистра судоходства Arc6. Оно используется в рамках проекта «Варандей» для круглогодичной морской транспортировки сырой нефти Тимано-Печорского и соседних нефтяных месторождений через экспортный терминал в Печорском море в районе пос. Варандей.

Боковой вид арктического челночного танкера двойного действия «Василий Динков» представлен на рис. 5. Основные технические характеристики судна, включая главные размерения, коэффициенты полноты и водоизмещение, соответствующие указанным в документе Trim and Stability Calculation, даны в табл. 1. На рис. 6 приведены кривые распределения углов наклона α и β по длине корпуса на уровне действующей ватерлинии, а также показана ее форма.

Для аналитической аппроксимации носовой ветви действующей ватерлинии в пределах длины носового заострения корпуса использовано уравнение следующего вида [6]:

$$y_{fore} = \frac{B_{wl}}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{x_{fore}}{L_{entry}} \right)^2 \right] \cdot \left[1 - b_{fore} \cdot \left(\frac{x_{fore}}{L_{entry}} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где B_{wl} – ширина судна по действующей ватерлинии; L_{entry} – длина носового заострения корпуса на уровне действующей ватерлинии; b_{fore} – безразмер-

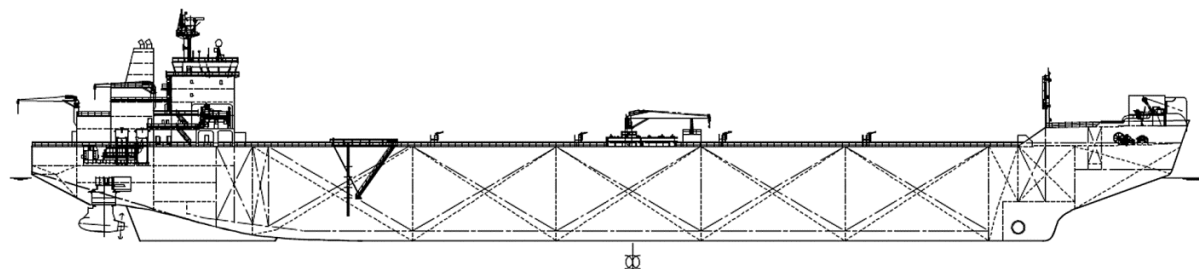


Рис. 5. Боковой вид арктического челночного танкера двойного действия «Василий Динков»

Fig. 5. Vasily Dinkov double-acting Arctic shuttle tanker: side view

Таблица 1. Основные технические характеристики судна

Table 1. Vasily Dinkov: principal technical particulars

Параметр	Размерность	Значение
Длина наибольшая	м	257,29
Длина между перпендикулярами	м	234,70
Ширина расчетная	м	34,00
Высота борта расчетная	м	21,00
Осадка предельная	м	14,00
Осадка проектная	м	14,00
Длина при проектной осадке	м	246,59
Ширина при проектной осадке	м	34,00
Коэффициент общей полноты при проектной осадке	–	0,800
Коэффициент полноты площади ватерлинии при проектной осадке	–	0,982
Коэффициент полноты площади мидель-шпангоута при проектной осадке	–	0,996
Водоизмещение объемное при проектной осадке	м ³	89 413

ный числовой параметр, характеризующий полноту площади носовой части действующей ватерлинии; $0 \leq x_{fore} \leq L_{entry}$ – размерная линейная координата, определяющая положение точки контакта корпуса со льдом в продольном направлении относительно кормовой границы носового заострения корпуса.

Длина носового заострения корпуса L_{entry} составляет 45,30 м, или ~18,5 % от длины судна по действующей ватерлинии. Параметр b_{fore} , полученный на основе метода наименьших квадратов, равен –0,244 при коэффициенте детерминации модели $R^2 > 0,99$. Кривизна носовой ветви действующей ватерлинии вычислена по формуле (2): ее максимальное значение достигает 0,0162 в районе 1 теор. шп. (при отсчете из носа в корму).

На рис. 7 (слева) показаны фактическая и аппроксимированная формы носовой ветви действующей ватерлинии в пределах длины носового заострения корпуса, а также приведено изменение ее кривизны.

Для аналитической аппроксимации кормовой ветви действующей ватерлинии в пределах длины кормового заострения корпуса использовано адаптированное уравнение (4), учитывающее наличие транцевой кормы:

$$y_{aft} = y_{transom} + \left(\frac{B_{wl}}{2} - y_{transom} \right) \times \left[1 - \left(\frac{x_{aft}}{L_{exit}} \right)^2 \right] \cdot \left[1 - b_{aft} \cdot \left(\frac{x_{aft}}{L_{exit}} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где $y_{transom}$ – полуширина кормового транца на уровне действующей ватерлинии; B_{wl} – ширина

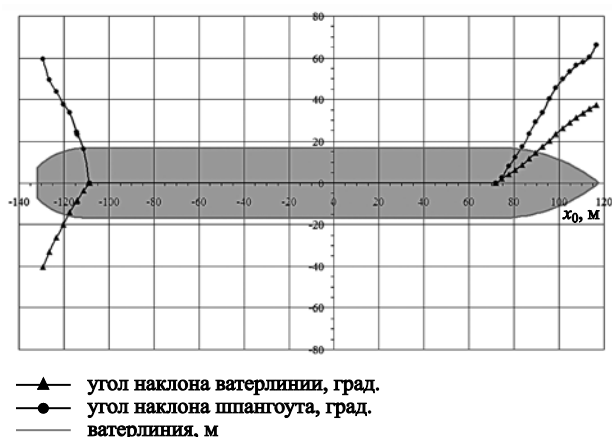


Рис. 6. Распределение углов наклона α и β по длине корпуса на уровне действующей ватерлинии и ее форма

Fig. 6. Distribution of α and β inclination angles over the hull length at the level of acting waterline. Form of the acting waterline

судна по действующей ватерлинии; L_{exit} – длина кормового заострения корпуса на уровне действующей ватерлинии; b_{aft} – безразмерный числовой параметр, характеризующий полноту площади кормовой части действующей ватерлинии; $0 \leq x_{aft} \leq L_{exit}$ – размерная линейная координата, определяющая положение точки контакта корпуса со льдом в продольном направлении относительно носовой границы кормового заострения корпуса.

Длина кормового заострения корпуса L_{exit} составляет 23,04 м, или ~9,5 % от длины судна по действующей ватерлинии. Параметр b_{aft} , полученный на основе метода наименьших квадратов, равен –0,288

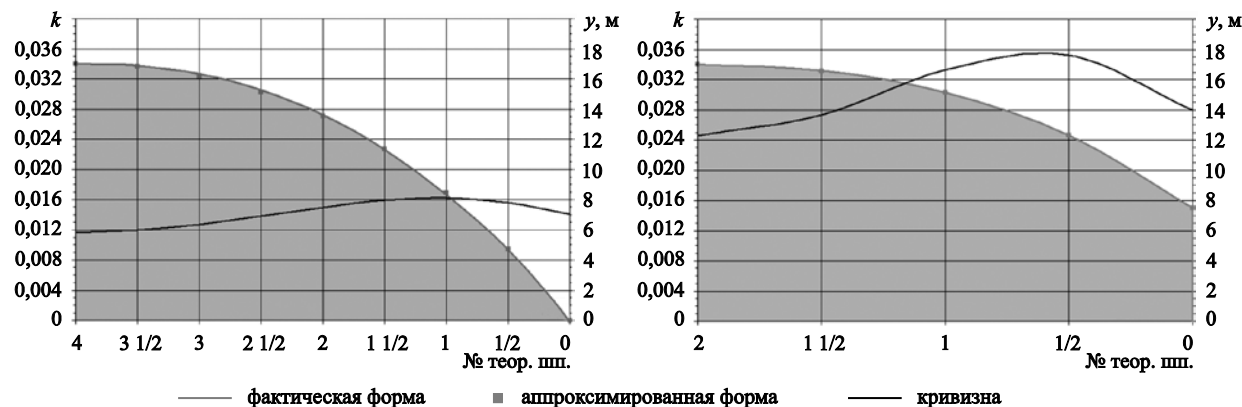


Рис. 7. Фактическая и аппроксимированная формы действующей ватерлинии и изменение ее кривизны в пределах длины носового (слева) и кормового (справа) заострений корпуса

Fig. 7. Actual and approximated forms of the acting waterline and the change of its curvature within the forebody entrance (left) and afterbody exit (right) length

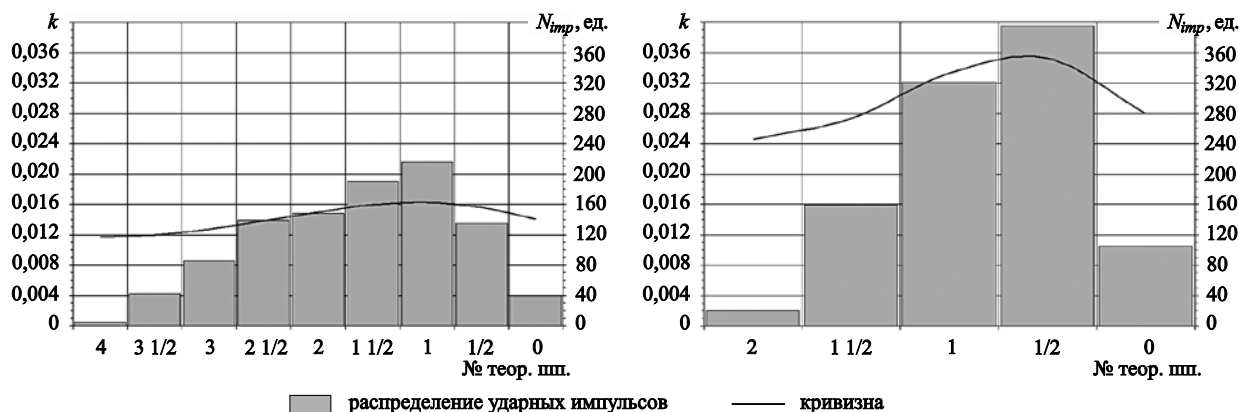


Рис. 8. Случайные распределения числа ударов по длине носового (слева) и кормового (справа) заострений корпуса на уровне действующей ватерлинии при расчетном значении параметра b

Fig. 8. Random distributions of the number of impacts over the forebody entrance (left) and afterbody exit (right) length at the level of acting waterline for the design value of b parameter

при коэффициенте детерминации модели $R^2 > 0,99$. Кривизна кормовой ветви действующей ватерлинии вычислена по формуле (2): ее максимальное значение достигает 0,0352 в районе 1/2 теор. шп. (при отсчете из кормы в нос).

На рис. 7 (справа) показаны фактическая и аппроксимированная формы кормовой ветви действующей ватерлинии в пределах длины кормового заострения корпуса, а также приведено изменение ее кривизны.

Применительно к расчетному судну случайные распределения числа ударов по длине носового

(при прямолинейном движении во льдах носом вперед) и кормового (при прямолинейном движении во льдах кормой вперед) заострений корпуса на уровне действующей ватерлинии получены с использованием метода моделирования, базовые теоретические положения которого приведены в предыдущем разделе.

В ходе проведения исследовательских тестовых прогонов суммарное число ударных импульсов, соответствующее общему числу реализаций случайных значений параметров ледовой нагрузки, условно принято равным 1000 ед. Значения безраз-

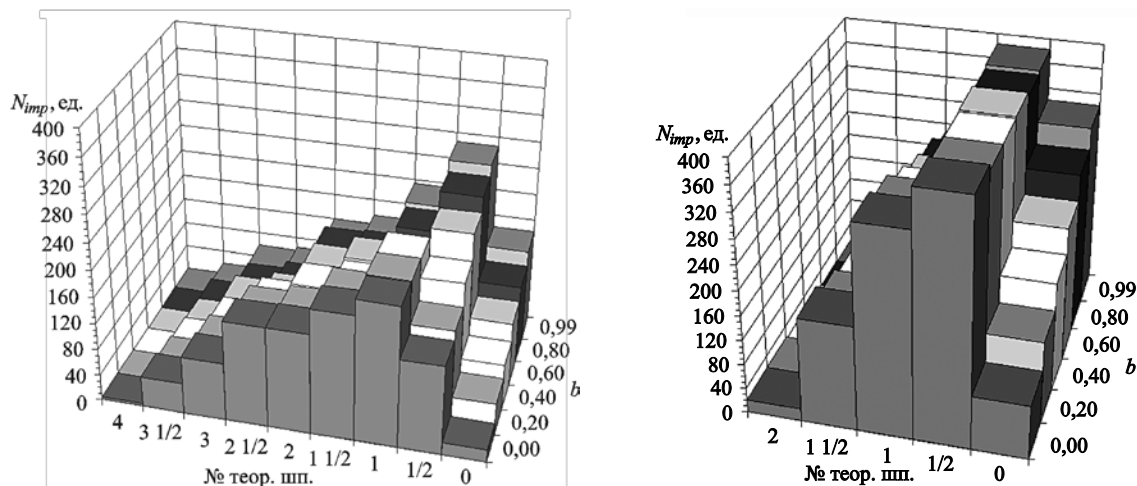


Рис. 9. Случайные распределения числа ударов по длине носового (слева) и кормового (справа) заострений корпуса на уровне действующей ватерлинии при различных значениях параметра b

Fig. 9. Random distributions of the number of impacts over the forebody entrance (left) and afterbody exit (right) length at the level of acting waterline for different values of b parameter

мерного числового параметра b , входящего в функциональную зависимость (3), подобраны из полуинтервала $[0, 1)$ таким образом, чтобы координата максимума (точнее, абсолютного максимума) плотности распределения числа ударов совпадала по длине корпуса с координатой максимума кривизны ватерлинии. Исходя из указанного условия, $b = 0,10$ как для носовой, так и для кормовой ветви действующей ватерлинии.

Визуализация полученных результатов вероятностного моделирования распределения ударных импульсов по длине корпуса при движении судна во льдах при расчетном значении параметра b выполнена на рис. 8.

Дополнительно применительно к расчетному судну воспроизведены случайные распределения числа ударов по длине носового и кормового заострений корпуса на уровне действующей ватерлинии при различных значениях параметра b из полуинтервала $[0, 1)$ с целью оценить его влияние на характер соответствующих распределений.

Визуализация полученных результатов вероятностного моделирования распределения ударных импульсов по длине корпуса при движении судна во льдах при различных значениях параметра b выполнена на рис. 9.

Заключение

Conclusion

В настоящей статье, носящей специализированный прикладной характер, изучены следующие основные аспекты, касающиеся вероятностного моделирования распределения ударных импульсов по длине корпуса при движении судна во льдах, которое составляет неотъемлемую процедуру единого процесса моделирования случайных нагрузок от воздействия льда на корпус судна:

- выполнены краткий обзор и причинно-следственный анализ результатов соответствующих экспериментальных исследований;
- представлены и дополнены базовые теоретические положения ранее предложенного метода моделирования случайного распределения числа ударов по длине корпуса при динамическом взаимодействии судна с ледяным покровом;
- уделено преимущественное внимание практической реализации указанного метода моделирования на примере арктического челночного танкера двойного действия «Василий Динков».

На основании информации, изложенной в статье, можно заключить, что сформулированный метод вероятностного моделирования распределения ударных импульсов по длине корпуса при движении судна во льдах, во-первых, достоверно и корректно описывает данные натурных наблюдений и испытаний, и, во-вторых, подтверждает адекватность и работоспособность применительно к современным судам, эксплуатирующимся в ледовых условиях. В связи с этим его использование в рамках решения задач оценки и прогнозирования ледовых нагрузок на суда в вероятностной постановке является обоснованным.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 23-29-00933 «Разработка вероятностной имитационной модели механического взаимодействия современных судов с ледяным покровом в обеспечение безопасной круглогодичной арктической навигации».

Список использованной литературы

1. Yakimov V.V., Letova T.I. Mathematical modeling of ice loads on ship hull in view of their stochastic nature: concept definition & studies review // Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'19). Delft: Delft University of Technology, 2019. P. POAC19-088 (9 p.).
2. Yakimov V.V., Letova T.I. Mathematical modeling of ice loads on ship hull in view of their stochastic nature: method development & solution implementation // Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'19). Delft: Delft University of Technology, 2019. P. POAC19-177 (13 p.).
3. Якимов В.В. Вероятностное имитационное моделирование как инструмент оценки и прогнозирования нагрузок от воздействия льда на корпус судна // Полярная механика. 2018. № 4. С. 206–216.
4. Тряскин В.Н., Якимов В.В. Имитационное моделирование ледовых нагрузок на корпус судна // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. № 67. С. 149–160.
5. Лихоманов В.А. Метод оценки ледовой прочности корпусных конструкций судов по данным натурных испытаний: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.03 / В.А. Лихоманов; Арктический и антарктический научно-исследовательский институт. Ленинград, 1982. 174 с.
6. Прочность судов, плавающих во льдах / Ю.Н. Попов, О.В. Фаддеев, Д.Е. Хейсин, А.А. Яковлев. Ленинград: Судостроение, 1967. 223 с.

7. Лихоманов В.А., Солостьянский Д.И. Тензометрические испытания ледокольно-транспортных судов // Труды ААНИИ. 1973. № 309. С. 111–117.
8. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II. Корпус : НД № 2-020101-152 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2022. 339 с.
7. Likhomanov V.A., Solostyansky D.I. Strain-gauging tests of icebreaking transport vessels // Transactions of AARI. 1973. No. 309. P. 111–117 (*in Russian*).
8. Rules for the classification and construction of sea-going ships. Part II. Hull : ND № 2-020101-152 / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2022. 339 p. (*in Russian*).

References

1. Yakimov V.V., Letova T.I. Mathematical modeling of ice loads on ship hull in view of their stochastic nature: concept definition & studies review // Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'19). Delft : Delft University of Technology, 2019. P. POAC19-088 (9 p.).
2. Yakimov V.V., Letova T.I. Mathematical modeling of ice loads on ship hull in view of their stochastic nature: method development & solution implementation // Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'19). Delft : Delft University of Technology, 2019. P. POAC19-177 (13 p.).
3. Yakimov V.V. Probabilistic simulation as a tool for assessing and forecasting the ice loads acting on ship hull // Polar Mechanics. 2018. No. 4. P. 206–216 (*in Russian*).
4. Tryaskin V.N., Yakimov V.V. Simulation of ice loads on ship hull // Transactions of Krylov State Research Centre. 2012. Vol. 67. P. 149–160 (*in Russian*).
5. Likhomanov V.A. Ice strength assessment method for ship hull structures based on the results of full-scale trials. Cand. Sci. Theses : 05.08.03 / AARI. Leningrad, 1982. 174 p. (*in Russian*).
6. Strength of ice-going ships / Yu.N. Popov, O.V. Faddeev, D.E. Kheisin, A.A. Yakovlev. Leningrad : Sudostroyeniye, 1967. 223 p. (*in Russian*).

Сведения об авторах

Якимов Владимир Владимирович, заведующий лабораторией ледокольной техники и ледовых качеств судов АО «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота». Адрес: 191015, Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., д. 6, лит. А. Тел.: +7 (812) 271-81-09. E-mail: YakimovVV@cniimf.ru.

Глебо Полина Юрьевна, специалист лаборатории ледокольной техники и ледовых качеств судов АО «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота». Адрес: 191015, Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., д. 6, лит. А. E-mail: GlebkoPY@cniimf.ru.

About the authors

Vladimir V. Yakimov, Head of the Laboratory of Icebreaking Technology and Ship Qualities in Ice Central Marine Research and Design Institute. Address: 6a, Kavalergardskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 191015. Tel.: +7 (812) 271-81-09. E-mail: YakimovVV@cniimf.ru.

Polina Yu. Glebko, Specialist of the Laboratory of Icebreaking Technology and Ship Qualities in Ice Central Marine Research and Design Institute. Address: 6a, Kavalergardskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 191015. E-mail: GlebkoPY@cniimf.ru.

Поступила / Received: 28.02.23
Принята в печать / Accepted: 29.08.23
© Якимов В.В., Глебо П.Ю., 2023