

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА КОРПУС СОВРЕМЕННЫХ СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ В НОСОВОМ И КОРМОВОМ РАЙОНАХ

В. В. Платонов

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

В. Н. Тряскин

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

Статья поступила в редакцию 11 апреля 2019 г.

На основании анализа особенностей формы корпуса в носовой и кормовой оконечностях современных судов ледового плавания, включая суда двойного действия, предлагается оригинальная методика построения зависимостей для определения параметров ледовых нагрузок на оконечности судов, имеющих ледовую категорию Российского морского регистра судоходства (РМРС). С учетом разработанной методики предложены рекомендации по определению расчетных ледовых нагрузок на оконечности судов двойного действия, вошедшие в проект требований Правил РМРС к конструкции ледовых усилений корпуса судов, предназначенных для эксплуатации кормой вперед.

Ключевые слова: суда двойного действия, ледовые нагрузки, Российский морской регистр судоходства, Правила Российского морского регистра судоходства.

Введение

В статье [1] приведен анализ архитектурно-конструктивных особенностей оконечностей современных судов двойного действия (СДД), который показал необходимость разработки новых расчетных зависимостей для определения ледовых нагрузок, ориентированных на использование в системе ледовой классификации Правил Российского морского регистра судоходства (РМРС). Этому посвящена настоящая публикация.

Методические основы определения расчетных ледовых нагрузок на корпус в носовом и кормовом районах

Согласно методологии действующих Правил РМРС контактные усилия, возникающие при ударе наклонным бортом о кромку ледяного поля, определяются

из решения дифференциального уравнения движения судна в направлении удара:

$$M_{\Pi} v \frac{dv}{d\zeta} + \int_F p dF = 0 \quad (1)$$

при начальном условии $v|_{\zeta=0} = v_{\Pi}$ и конечном условии $v = kv_{\Pi}$, где v — скорость внедрения борта судна в лед; ζ — глубина внедрения; F — площадь зоны контакта; p — контактное давление; k — коэффициент, определяющий часть скорости в направлении удара, которую сохраняет судно, если при некоторой глубине внедрения происходит разрушение ледяного поля от изгиба; M_{Π} и v_{Π} — масса и скорость судна, приведенные к направлению удара.

Приведенные масса и скорость судна, определяющие часть энергии движущегося судна, которая тра-

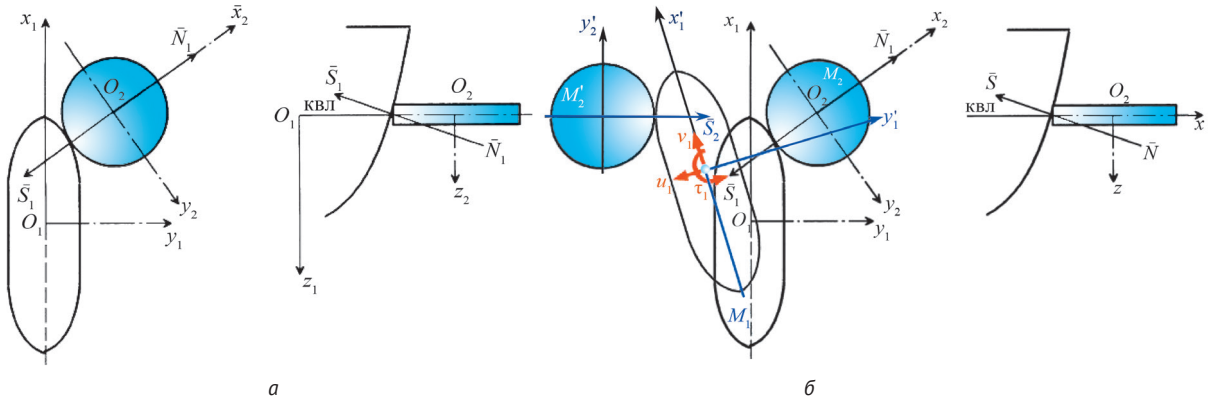


Рис. 1. Модели прямого (а) и отраженного (б) ударов
 Fig. 1. Models of direct (a) and return (b) impact

тится на смятие и разрушение кромки льда, находясь в результате решения задачи о внецентренном косом ударе твердого тела (судна) о кромку ледяного поля (плавающей льдины) [2] (рис. 1). Выражение для контактного давления получено из решения задачи о выжимании тонкого слоя вязкой жидкости (промежуточного слоя) между двумя поверхностями, одна из которых является твердым телом, а другая — поверхностью разрушения. Это гидродинамическая модель удара твердого тела о лед (далее — ГДМ) [3]. Значения коэффициента k определяются из условия равенства вертикальной составляющей суммарного контактного усилия P_z нагрузке P_b , разрушающей ледяной покров заданной толщины и прочности [4]; $P_z = P_b = m\sigma_f H^2$, где m — числовой коэффициент; σ_f — предел прочности льда на изгиб; H — толщина льда.

В случае удара о кромку ледяного поля приведенная масса определяется по зависимости $M_{II} = \frac{\Delta}{C'}$,

а приведенная скорость — по соотношению $v_{II} = l_1 v_0$, где Δ — масса судна (водоизмещение); C' — безразмерный коэффициент приведения массы; l_1 — направляющий косинус нормали к поверхности корпуса судна в точке контакта со льдом; v_0 — скорость поступательного движения судна в момент удара. Для определения значений коэффициентов приведения массы C' , скорости и l_1 могут использоваться аналитические зависимости (см. ниже) или специализированное программное обеспечение [5].

Расчетные ледовые нагрузки в требованиях Правил РМРС [6] характеризуются тремя параметрами: интенсивностью нагрузки — максимальным контактным давлением p , высотой зоны контакта b и длиной зоны контакта l_z и определяются в зависимости от категории ледовых усилений, значений параметров формы корпуса на уровне ледовой ватерлинии и водоизмещения (массы судна).

Решение задачи (1) об ударе корпуса судна наклонным бортом о скругленную кромку с использо-

ванием зависимостей ГДМ [3] позволяют получить все параметры ледовой нагрузки. Решение показывает, что максимальное давление в зоне контакта со льдом, высота и длина зоны контакта определяются следующими формулами [4]:

$$p = 1,25 v_0^{13} a_p \Delta^{\frac{1}{6}} (2R)^{\frac{1}{12}} F_p f_p, \quad (2)$$

$$b = 1,25 v_0^{\frac{7}{12}} a_p^{-\frac{2}{5}} \Delta^{\frac{1}{3}} (2R)^{-\frac{1}{6}} F_b f_b, \quad (3)$$

$$l_z = 1,8 \sqrt{2R \sin \beta'}, \quad (4)$$

где a_p — условный параметр, характеризующий динамическую прочность льда при раздроблении; R — радиус скругления кромки льдины в точке контакта;

$$F_p = l_1^{\frac{13}{24}} F; \quad (5)$$

$$F_b = l_1^{\frac{7}{12}} F^2; \quad (6)$$

$$F = (C')^{-\frac{1}{6}} (\cos \beta')^{-\frac{1}{6}} (\sin \beta')^{\frac{1}{4}}, \quad (7)$$

где $l_1 = \sin \alpha \cos \beta'$ — коэффициент приведения скорости к направлению удара; α — угол наклона ватерлинии к диаметральной плоскости (ДП) в точке контакта борта судна со льдом; $\beta' = \arctg(\tg \beta \cos \alpha)$ — угол наклона борта к вертикали в плоскости, перпендикулярной основной плоскости и совпадающей с нормалью к борту в точке удара (далее β' — угол наклона борта к вертикали); $f_p(k)$ и $f_b(k)$ — безразмерные функции, характеризующие влияние разрушения ледяного покрова на величину контактного давления и высоты зоны контакта.

Зависимости для определения расчетных параметров ледовой нагрузки: давления p и высоты зоны

контакта b в требованиях Правил РМРС представлены в следующем виде:

$$p = p^* \Delta^{\frac{1}{6}} v \left(\frac{x}{L}, \alpha, \beta \right), \quad (8)$$

$$b = b^* \Delta^{\frac{1}{3}} u \left(\frac{x}{L}, \alpha, \beta \right), \quad (9)$$

где p^* и b^* — измерители ледовой прочности корпуса судна, зависящие от нормативной прочности бортовых конструкций (критерия прочности), параметров ледяного покрова (толщины, прочности льда на раздробление и на изгиб, геометрии кромки льдины, расчетной скорости).

Значения этих измерителей находятся в соответствии с требованиями к категории ледовых усилений. Принятая философия нормирования ледовой прочности является основой для нормирования значений этих измерителей. Остальные члены зависимостей (8) и (9) — это характеристики конкретного судна: водоизмещение и функции параметров формы корпуса в районе ударного взаимодействия.

Функции формы $v \left(\frac{x}{L}, \alpha, \beta \right)$ и $u \left(\frac{x}{L}, \alpha, \beta \right)$ явля-

ются аппроксимациями соответственно функций F_p и F_b , входящих в выражения (5) и (6), от которых зависят расчетная интенсивность ледовой нагрузки p и высота зоны контакта корпуса со льдом b для носового района ледового пояса [4]. Они были построены на основе анализа формы корпуса традиционных судов ледового плавания, находившихся в эксплуатации в 1980-х годах (в процессе разработки требований к ледовым усилениям Правил Регистра СССР 1981 г). Для этих судов с достаточной для практических расчетов точностью можно было приближенно полагать угол наклона борта к вертикали в плоскости нормали β' равным углу наклона борта к вертикали в плоскости шпангоута β . Тогда, учитывая приближенную зависимость от углов α и β , коэффициента приведения скорости $l_1 \cong \sin \alpha \cos \beta$, можно получить¹:

$$\begin{aligned} F_p &= (C')^{-\frac{1}{6}} \frac{(\sin \alpha)^{\frac{13}{24}} (\cos \beta)^{\frac{13}{24}}}{(\cos \beta)^{\frac{1}{6}} (\sin \beta)^{\frac{1}{4}}} \approx \\ &\approx \frac{(\sin \alpha)^{\frac{13}{24}}}{(\operatorname{tg} \beta)^{\frac{1}{4}}} (\cos \beta)^{\frac{1}{6}} (C')^{-\frac{1}{6}} \approx \\ &\approx 0,36 (C')^{-\frac{1}{6}} \sqrt[4]{\frac{\alpha^2}{\beta}} = f_v \left(\frac{x}{L} \right) \sqrt[4]{\frac{\alpha^2}{\beta}} = v \left(\frac{x}{L}, \alpha, \beta \right), \end{aligned} \quad (10)$$

¹ Числовой множитель 0,36 в формуле (10) учитывает пере-

вод радианов в градусы: $\sqrt[4]{\frac{57,3}{(57,3)^2}} \approx 0,36$.

$$F_b = (C')^{-\frac{1}{3}} \frac{(\sin \alpha)^{\frac{7}{12}} (\cos \beta)^{\frac{7}{12}}}{(\cos \beta)^{\frac{1}{3}} (\sin \beta)^{\frac{1}{2}}} \approx \quad (11)$$

$$\approx (C')^{-\frac{1}{3}} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} = f_u \left(\frac{x}{L} \right) \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} = u \left(\frac{x}{L}, \alpha, \beta \right).$$

Такие формулы для определения функций формы корпуса при расчете ледовых нагрузок на носовой район ледового пояса впервые были внедрены

в Правила Регистра СССР 1981 г. [7]. Функции $f_v \left(\frac{x}{L} \right)$ и $f_u \left(\frac{x}{L} \right)$ отражают статистическую зависимость параметров $0,36(C')^{-\frac{1}{6}}$ и $(C')^{-\frac{1}{3}}$ от углов α , β и относительной абсциссы точки контакта борта со льдом $\frac{x}{L}$. Из выражений (10) и (11) следует, что

когда β существенно меньше α , функции v и u резко возрастают. Практически это имеет место в районе перехода в цилиндрическую вставку у судов с вертикальными бортами в средней части и в районе носовой оконечности у судов с бульбовыми обводами. При этом формулы дают неустойчивые результаты, существенно зависящие от точности снятия углов α и β с теоретического чертежа. Поэтому в Правилах Регистра СССР 1981—1990 гг.

были введены ограничения на максимальные значения $v_m \left(\frac{x}{L}, \alpha, \beta \right)$ и $u_m \left(\frac{x}{L}, \alpha, \beta \right)$, равные 0,72 и 0,80 соответственно².

Для построения зависимостей $f_v \left(\frac{x}{L} \right)$ и $f_u \left(\frac{x}{L} \right)$

был выполнен комплекс специальных исследований. Произведена статистическая обработка формы корпуса в носовом районе 40 транспортных судов ледового плавания с различным ледовым классом и водоизмещением. Построены безразмерные теоретические чертежи этих судов. Показано, что безраз-

мерные ординаты ватерлиний $\frac{2y_i}{B}$ практически для

всех судов находятся в интервале $(\bar{y}_m - 1,5\sigma) \div (\bar{y}_m + 1,5\sigma)$, где σ — стандарт безразмерных ординат, а \bar{y}_m — математическое ожидание. Конструктивные ватерлинии транспортных судов, построенные по средним значениям безразмерных ординат \bar{y}_m , слегка выпуклые, ватерлинии, построенные по безразмерным ординатам $\bar{y}_m - 1,5\sigma$, S-образные, по $\bar{y}_m + 1,5\sigma$ — выпуклые.

² В последней редакции Правил РМРС максимальное значение параметра u_m увеличено до 0,92.

В зависимости от типа ватерлинии изменяется и протяженность носового заострения.

Формулы (10) и (11), включенные в Правила Регистра СССР / РМРС (с 1999 г.), дают приемлемые результаты для судов, у которых безразмерные ординаты ватерлиний выбираются как математическое ожидание. Для S-образных ватерлиний (протяженность носового заострения около 40%) и особенно для выпуклых (протяженность носового заострения 20—25%) делается ошибка в опасную сторону.

Как было показано в [1], форма корпуса современных судов ледового плавания, в том числе СДД, значительно изменилась. Использование существующих аппроксимаций для функций формы применительно к современным формам оконечностей СДД достаточно часто приводит к большим расхождениям с прямыми расчетами по методике [7] (или по аналитическим зависимостям). Особенно чувствительны к применяемым формулам районы перехода носового/кормового заострений в цилиндрическую вставку у судов с вертикальными бортами в средней части, а также самые носовые/кормовые участки носового/кормового районов, где углы наклона шпангоутов и ватерлиний наибольшие.

В требованиях к ледовым усилениям судов ледовых классов и ледоколов (раздел 3.10 ч. II Правил РМРС) принято решение ввести новые зависимости для определения функций формы, которые позволят ликвидировать указанные недостатки. Для построения этих зависимостей предложена оригинальная методика, основанная на теории планирования эксперимента [9].

Расчетные зависимости для определения функций формы

Функции формы F_p и F_b , определяющие влияние на ледовые нагрузки формы корпуса, для судна заданных размеров зависят от положения точки контакта со льдом относительно центра тяжести судна

$\frac{x_1}{L}$, углов наклона борта к вертикали β' и ватерли-

нии к ДП α в точке контакта. Исследования показали, что коэффициент приведения массы судна C' слабо зависит от соотношений главных размерений

судна $\frac{L}{B}$, $\frac{B}{d}$, $\frac{L}{D}$ [2]. Следовательно, можно про-

анализировать зависимости функций формы применительно к конкретному судну, а затем результаты исследований распространить на общий случай.

Расчетные зависимости, пригодные для использования в Правилах РМРС, не должны быть очень сложными. Для их построения предложено использовать аппарат теории планирования эксперимента — численного эксперимента на ЭВМ с программной моделью, описывающей поведение системы — корпуса судна при ударе о лед [10].

Программная модель формируется следующими зависимостями, полученными из рассмотрения задачи о внецентренном косом ударе твердого тела о не разрушаемое от изгиба ледяное поле [2]:

- коэффициент приведения к направлению удара скорости судна

$$l_1 = \sin \alpha \cos \beta';$$

- коэффициент приведения к направлению удара массы судна

$$C' = \left(\frac{l_1^2}{1 + \lambda_{11}} + \frac{m_1^2}{1 + \lambda_{22}} + \frac{n_1^2}{1 + \lambda_{33}} \right) + \left[\frac{\lambda_1^2}{I_x (1 + \lambda_{23})} + \frac{\mu_1^2}{I_y (1 + \lambda_{13})} + \frac{\nu_1^2}{I_z (1 + \lambda_{12})} \right] \Delta, \quad (12)$$

где l_1 , m_1 , n_1 — косинусы углов, которые образуют нормаль к поверхности борта судна; λ_1 , μ_1 , ν_1 — плечи ударного импульса; I_x , I_y , I_z — моменты инерции массы судна относительно продольной, поперечной и вертикальной осей, проходящих через центр тяжести судна; λ_{11} , λ_{22} , λ_{33} , λ_{23} , λ_{13} , λ_{12} — коэффициенты присоединенных масс и моментов инерции присоединенных масс; Δ — масса судна (водоизмещение).

Косинусы углов, которые образуют нормаль к поверхности борта судна, и плечи ударного импульса находятся по следующим зависимостям:

$$l_1 = \sin \alpha \cos \beta',$$

$$m_1 = \cos \alpha \cos \beta',$$

$$n_1 = -\sin \beta',$$

$$\lambda_1 = y_1 n_1 - z_1 m_1,$$

$$\mu_1 = z_1 l_1 - x_1 n_1,$$

$$\nu_1 = x_1 m_1 - y_1 l_1,$$

где x_1 , y_1 , z_1 — координаты точки удара судна о льдину относительно центра тяжести судна.

Моменты инерции массы судна определяются по приближенным формулам [2]:

$$I_x = \Delta \left(\frac{C_w^2 B^2}{11,4 C_B} + \frac{D^2}{12} \right),$$

$$I_y = 0,07 C_w \Delta L^2,$$

$$I_z = \frac{\Delta L^2}{16},$$

где C_w , C_B — коэффициенты полноты площади расчетной ватерлинии и общей полноты корпуса

судна; L , B , D — длина, ширина и высота борта судна; Δ — массовое водоизмещение.

Для расчета коэффициентов присоединенных масс судна может быть использовано специализированное программное обеспечение [5] или приближенные формулы, обеспечивающие достаточную точность оценки [2]:

$$\begin{aligned}\lambda_{11} &= 0, \\ \lambda_{22} &= \frac{2d}{B}, \\ \lambda_{33} &= 0,667 \frac{\alpha_w^2}{C_B(1+\alpha_w)} \frac{B}{d}, \\ \lambda_{23} &= 0,25, \\ \lambda_{12} &= 0,3 + 0,05 \frac{L}{B}, \\ \lambda_{13} &= \frac{B}{d} \frac{1}{(3-2\alpha_w)} \frac{1}{(3-\alpha_w)}.\end{aligned}$$

При решении задач построения интерполяционных моделей с использованием аппарата планирования эксперимента наибольшее распространение получили:

- линейные модели — полиномы первой степени

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i; \quad (13)$$

- модели типа неполный квадрат

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{j>i=1}^k b_{ij} x_i x_j; \quad (14)$$

- квадратичные модели (полиномы второго порядка)

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{j>i=1}^k b_{ij} x_i x_j. \quad (15)$$

Для их построения широко используется центральное композиционное планирование [11]. Центральные композиционные планы являются ортогональными. Они позволяют получить независимые оценки коэффициентов регрессии, которые остаются несмещенными даже после отбрасывания части исследуемых факторов.

В процессе решения практических задач, связанных с проблемами автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна, сформировались методические принципы и алгоритмы построения многофакторных регрессионных моделей с использованием аппарата планирования эксперимента.

Разработана и предлагается следующая общая структура алгоритма:

- 1) отбор существенных факторов и оценка реальных границ областей их определения;
- 2) формирование матрицы планирования эксперимента;
- 3) выполнение численных экспериментов над программной моделью системы, формирование массива значений функции отклика;
- 4) выбор модели и расчет коэффициентов регрессии;
- 5) оценка адекватности регрессионной модели и принятие решений, если выбранная модель неадекватна.

Предлагаемый алгоритм заложен в основу программного комплекса (ПК) «Полином» [10], реализующего планирование эксперимента и построение полиномиальных моделей для различных целей, в том числе и для проектирования конструкций корпуса морских судов и технических сооружений.

Исследования показали, что при построении регрессионных моделей для коэффициента приведения массы судна C' целесообразно принять в качестве независимо варьируемых параметров безразмерную абсциссу точки контакта со льдом относи-

тельно носового перпендикуляра $\frac{x}{L_{pp}}$ (L_{pp} — длина судна между перпендикулярами), угол наклона борта β' и угол ватерлинии α в этой точке.

Для удобства выполнения расчетов независимые переменные (факторы) представляют в кодированном виде. Кодированные значения факторов (+1 для верхнего уровня, -1 для нижнего уровня и 0 для основного) получаются при помощи преобразования

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{0i}}{\Delta x_i}, \quad (16)$$

где x_i — кодированное (безразмерное) значение фактора; \tilde{x}_i — натуральное (размерное) значение фактора; \tilde{x}_{0i} — натуральное (размерное) значение основного уровня фактора; Δx_i — интервал варьирования. Переход к натуральному значению осуществляется по формуле

$$\tilde{x}_i = \tilde{x}_{0i} + x_i \Delta x_i. \quad (17)$$

Для построения квадратичных моделей необходимо знать значение функции отклика для трех значений каждого параметра. В центральном композиционном планировании в пределах области допустимых значений варьируемого параметра рассматриваются: верхний (+1) и нижний (-1) уровни, основной уровень (0) и уровни фактора, отстоящие от основного на величину так называемого звездного плеча (+ALFA) и (-ALFA). Значение звездного плеча зависит от количества варьируемых параметров и общего количества экспериментов. Общее количество экспериментов при k варьируемых параметрах

Таблица 1. Пример задания значений варьируемых параметров

Уровень фактора		Варьируемый параметр		
		$\frac{x}{L_{pp}}$	α	β'
Номер параметра (фактора)		1	2	3
Звездное плечо +	+ALFA	0,350	45,000	65,000
Звездное плечо –	–ALFA	0,050	5,000	5,000
Верхний уровень	+1	0,3234	41,455	59,683
Нижний уровень	–1	0,0766	8,545	10,317
Основной уровень	0	0,2000	25,000	35,000
Интервал варьирования	ΔX	0,1234	16,455	24,683

$N = 2^k + 2k + 1$. Значение звездного плеча определяется по формуле

$$\pm ALFA = \pm \sqrt{0,5 \left[(N2^k)^{\frac{1}{2}} - 2^k \right]}$$

Связь между значениями факторов на верхнем и нижнем уровнях и в звездных точках определяется по формуле $x_{\pm 1} = [x_{\pm ALFA} - x_0(1 - ALFA)] / ALFA$.

Отбор существенных факторов (варьируемых параметров) и оценка областей их допустимых зна-

чений делается на основе анализа информации по форме корпуса транспортных судов. В табл. 1 в качестве примера приведены возможные значения варьируемых параметров на разных уровнях.

Матрица центрального композиционного планирования формируется программным комплексом «Полином». Пример матрицы планирования для исходных данных табл. 1 представлены в табл. 2.

Выполнение численных экспериментов над программной моделью системы

При выполнении численных экспериментов в ответствии с матрицей планирования (см. табл. 2) использовалась математическая модель, представ-

Таблица 2. Пример матрицы планирования

№	Кодированные значения				Натуральные значения		
	x_0	$x_1 \equiv \frac{x}{L_{pp}}$	$x_2 \equiv \alpha$	$x_3 \equiv \beta'$	\tilde{x}_1	\tilde{x}_2	\tilde{x}_3
1	1	–1	–1	–1	0,0766	8,545	10,317
2	1	1	–1	–1	0,3234	8,545	10,317
3	1	–1	1	–1	0,0766	41,455	10,317
4	1	1	1	–1	0,3234	41,455	10,317
5	1	–1	–1	1	0,0766	8,545	59,683
6	1	1	–1	1	0,3234	8,545	59,683
7	1	–1	1	1	0,0766	41,455	59,683
8	1	1	1	1	0,3234	41,455	59,683
9	1	–ALFA	0	0	0,0500	25,000	35,000
10	1	+ALFA	0	0	0,3500	25,000	35,000
11	1	0	–ALFA	0	0,2000	5,000	35,000
12	1	0	+ALFA	0	0,2000	45,000	35,000
13	1	0	0	–ALFA	0,2000	25,000	5,000
14	1	0	0	+ALFA	0,2000	25,000	65,000
15	1	0	0	0	0,2000	25,000	35,000

Таблица 3. Результаты численного моделирования характеристик приведенной массы

№	$x_1 \equiv \frac{x}{L_{pp}}$	$x_2 \equiv \alpha$	$x_3 \equiv \beta'$	Результаты численного моделирования		
				C'	$(C')^{-\frac{1}{6}}$	$(C')^{-\frac{1}{3}}$
1	0,07659	8,54467	10,31701	2,1586	0,87964	0,7738
2	0,32341	8,54467	10,31701	0,9308	1,01202	1,0242
3	0,07659	41,45533	10,31701	1,5102	0,93360	0,8716
4	0,32341	41,45533	10,31701	0,8863	1,02032	1,0411
5	0,07659	8,54467	59,68299	2,3065	0,86998	0,7569
6	0,32341	8,54467	59,68299	1,8772	0,90035	0,8106
7	0,07659	41,45533	59,68299	2,0328	0,88849	0,7894
8	0,32341	41,45533	59,68299	1,7077	0,91467	0,8366
9	0,05000	25,00000	35,00000	2,0743	0,88550	0,7841
10	0,35000	25,00000	35,00000	1,1985	0,97027	0,9414
11	0,20000	5,00000	35,00000	1,7741	0,90888	0,8261
12	0,20000	45,00000	35,00000	1,3408	0,95230	0,9069
13	0,20000	25,00000	5,00000	1,2322	0,96580	0,9328
14	0,20000	25,00000	65,00000	2,2532	0,87338	0,7628
15	0,20000	25,00000	35,00000	1,5977	0,92487	0,8554

ленная совокупностью математических зависимостей (5)—(7). Результаты моделирования — массивы значений функций отклика, C' , $(C')^{-\frac{1}{6}}$, $(C')^{-\frac{1}{3}}$ показаны в табл. 3.

Выбор модели и расчет коэффициентов регрессии

Коэффициенты регрессии, полученные с использованием ПК «Полином», приведены в табл. 4. Регрессионные модели построены для коэффициента приведения массы, значения которого определялись по формуле (12), а также для значений этого коэффициента в степени $-1/6$ и $-1/3$, как это следует из формул для функций формы (5)—(7). Выполнен анализ квадратичных моделей (ИМ-2), моделей типа неполный квадрат (ИМ-1), линейных моделей. Линейные модели получены из моделей типа неполный квадрат путем отбрасывания составляющих, содержащих парные взаимодействия (полагалось, что $b_{12} = b_{13} = b_{23} = 0$).

Оценка адекватности полученных моделей

Модель считается адекватной в том случае, если отклонение точной величины исследуемого параметра y от его значения, предсказанного регрессионной моделью \hat{y} , не превосходит допустимой величины, как это следует из условия $\varepsilon = \frac{\hat{y}}{y} - 1 \leq [\varepsilon]$. До-

пустимой принята величина $[\varepsilon] = 0,025 - 0,050$, или 2,5—5%.

Результаты построения квадратичных моделей для коэффициента приведения массы судна, полученные с использованием ПК «Полином» и представленные в табл. 4, показывают, что квадратичная модель для коэффициента приведения массы судна (15)

$$C \equiv \tilde{y}(X, b) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{j>i=1}^k b_{ij} x_i x_j \quad (18)$$

не обеспечивает адекватности описания зависимости этой характеристики от выбранных варьируемых параметров.

Результаты построения квадратичных моделей для коэффициента приведения массы судна, полученные с использованием ПК «Полином», показывают, что квадратичные модели (18) для характеристик приведенной массы судна $C^{-\frac{1}{6}}$ и $C^{-\frac{1}{3}}$, входящих в форму-

лы для определения функций формы (5) и (6) и представляющих цель моделирования, предсказывают их значения с погрешностью не более 1—2%. Это говорит о возможности применения для этих характеристик более «грубых», но простых моделей.

Результаты исследования показывают, что для характеристики $C^{-\frac{1}{6}}$ может быть предложена линейная модель

$$C^{-\frac{1}{6}} \equiv \tilde{y}(X, b) = b_0 + \sum_{i=1}^{k=3} b_i x_i, \quad (19)$$

Таблица 4. Результаты расчета коэффициентов регрессии

Коэффициент регрессии	IM-2	IM-2	IM-1	IM-2	IM-1
	C'	$(C')^{-\frac{1}{6}}$	$(C')^{-\frac{1}{6}}$	$(C')^{-\frac{1}{3}}$	$(C')^{-\frac{1}{3}}$
b_0	1,60793	0,92479	0,92738	0,85525	0,86302
b_1	-0,33507	0,03457	0,03446	0,06500	0,06511
b_2	-0,15179	0,01350	0,01189	0,02478	0,02166
b_3	0,33587	-0,03509	-0,03401	-0,06606	-0,06463
b_{11}	0,01701	0,00212	—	0,00513	—
b_{22}	-0,03643	0,00395	—	0,00763	—
b_{33}	0,08897	-0,00350	—	-0,00502	—
b_{12}	0,08851	-0,00623	-0,00623	-0,01094	-0,01094
b_{13}	0,13716	-0,02032	-0,02032	-0,03986	-0,03986
b_{23}	0,03121	-0,00368	-0,00368	-0,00702	-0,00702

а для характеристики $C^{-\frac{1}{3}}$ следует в состав линейной модели добавить член, содержащий парные взаимодействия b_{13}, x_1, x_3 :

$$C^{-\frac{1}{3}} \equiv \tilde{y}(X, b) = b_0 + \sum_{i=1}^{k=3} b_i x_i + b_{13} x_1 x_3. \quad (20)$$

Погрешность моделирования при этом не превышает 4%. Значения коэффициентов регрессии для этих моделей приведены в табл. 5.

Предлагаемые расчетные зависимости

Значения коэффициентов регрессии, представленные в табл. 5, соответствуют кодированным значениям варьируемых параметров. Для удобства использования регрессионных формул в тексте Правил РМРС необходимо их представить в виде, когда в расчетные формулы входят варьируемые параметры в натуральных (декодированных) значениях (17). Модель (19), преобразованная относительно декодированных (натуральных) значений варьируемых параметров с учетом связи между кодированными и декодированными значениями, будет иметь вид

$$C^{-\frac{1}{6}} \equiv \tilde{y}(X, b) = b'_0 + \sum_{i=1}^{k=3} b'_i \tilde{x}_i, \quad (21)$$

где $b'_0 = b_0 + \sum_{i=1}^{k=3} \left(\frac{b_i}{\Delta x_i} \right) \tilde{x}_{0i} = b_0 + \sum_{i=1}^{k=3} b'_i \tilde{x}_{0i}$; $b' = \frac{b_i}{\Delta x_i}$,

а модель (20) —

$$C^{-\frac{1}{3}} \equiv \tilde{y}(X, b) = b''_0 + \sum_{i=1}^{k=3} b''_i x_i + b''_{13} x_1 x_3, \quad (22)$$

где $b''_0 = b_0 - \sum_{i=1}^{k=3} \left(\frac{b_i}{\Delta x_i} \right) \tilde{x}_{0i} + \frac{b_{13}}{\Delta x_1 \Delta x_3} \tilde{x}_{01} \tilde{x}_{03}$;

$$b''_1 = \frac{b_1}{\Delta x_1} - \frac{b_{13}}{\Delta x_1 \Delta x_3}; \quad b''_2 = \frac{b_2}{\Delta x_2}; \quad b''_3 = \frac{b_3}{\Delta x_3} - \frac{b_{13}}{\Delta x_1 \Delta x_3};$$

$$b''_{13} = \frac{b_{13}}{\Delta x_1 \Delta x_3}.$$

Значения преобразованных коэффициентов регрессии для моделей (21) и (22) приведены в табл. 6.

Таблица 5. Результаты расчета коэффициентов регрессии

Коэффициент регрессии	IM-1	IM-1
	$(C')^{-\frac{1}{6}}$	$(C')^{-\frac{1}{3}}$
b_0	0,92738	0,86302
b_1	0,03446	0,06511
b_2	0,01189	0,02166
b_3	-0,03401	-0,06463
b_{11}	—	—
b_{22}	—	—
b_{33}	—	—
b_{12}	—	—
b_{13}	—	-0,03986
b_{23}	—	—

Таблица 6. Регрессионные коэффициенты для моделей (21) и (22)

Модель (21)		Модель (22)	
b'_0	9,0171E-01	b''_0	7,2466E-01
b'_1	2,7919E-01	b''_1	9,8554E-01
b'_2	7,2234E-04	b''_2	1,3161E-03
b'_3	-1,3779E-03	b''_3	-1,5705E-06
—	—	b''_{13}	-1,3085E-02

Если перейти к фактическим обозначениям варьируемых параметров, формула (21) примет вид

$$C^{-\frac{1}{6}} = b'_0 + b'_1 \frac{x}{L_{pp}} + b'_2 \alpha + b'_3 \beta', \quad (23)$$

а формула (22) —

$$C^{-\frac{1}{3}} = b''_0 + b''_1 \frac{x}{L_{pp}} + b''_2 \alpha + b''_3 \beta' + b''_{13} \frac{x}{L_{pp}} \beta'. \quad (24)$$

В таком виде они могут быть представлены в Правилах РМРС.

В табл. 7 приведен общий вид построенных функций формы для носовой и кормовой оконечностей современных СДД с использованием предложенной методики. Коэффициенты данных зависимостей приведены в [8], причем кормовые оконечности

с одним, двумя и тремя винторулевыми комплексами (ВРК) имеют разные функции формы.

Переход к новым зависимостям ликвидирует необоснованное увеличение значений функций формы для районов перехода в цилиндрическую вставку вследствие существенного влияния малых углов наклона борта, что следует из структуры зависимостей Правил. Это позволит исключить ограничения на параметры формы корпуса (диапазоны углов) при определении расчетных ледовых нагрузок по требованиям Правил.

Особенности определения ледовых нагрузок на конструкции кормовой оконечности судов, оборудованных ВРК

Регламентация ледовых нагрузок на район носового заострения судов ледового плавания в Правилах РМРС [5] осуществляется в соответствии с базовыми опасными режимами движения (БОРД) для первичного (прямого) удара о лед на основании ГДМ [3]. Для каждой ледовой категории задается единая кривая «скорость судна — толщина льда», ассоциированная с критерием предельной прочности, т. е. кривая БОРД (рис. 2). Превышение БОРД может привести к появлению в конструкциях фиксируемых остаточных пластических деформаций, поскольку ледовым нагрузкам, воздействующим на корпус судна при движении по БОРД, ставятся в соответствие критерии и методы расчета прочности, учитывающие резервы пластического деформирования материала [12].

Основным режимом СДД является самостоятельное движение кормой вперед, поэтому нагрузки на кормовую оконечность связаны с прямыми ударами кормой о ледяное поле при движении задним ходом, маневрировании в канале

Таблица 7. Зависимости для функций формы для носовой и кормовой оконечностей

Носовая оконечность	
Интенсивность ледовой нагрузки	$v_m^H = f_v \left(b_0^v + b_1^v \frac{x}{L} + b_2^v \alpha + b_3^v \beta' \right)$
Высота распределения	$u_m^H = f_u \left(b_0^u + b_1^u \frac{x}{L} + b_2^u \alpha + b_{13}^u \frac{x}{L} \beta' \right)$
Кормовая оконечность	
Интенсивность ледовой нагрузки	$v_m^K = f_v \left(b_0^v + b_1^v \frac{x}{L} + b_2^v \alpha + b_3^v \beta' \right)$
Высота распределения	$u_m^K = f_u \left(b_0^u + b_1^u \frac{x}{L} + b_2^u \alpha + b_3^u \beta' + b_{13}^u \frac{x}{L} \beta' + b_{23}^u \alpha \beta' \right)$
$f_v = \frac{(\sin \alpha \cos \beta')^{0,54}}{(\cos \beta')^{0,17} (\sin \beta')^{0,25}}, \quad f_u = \frac{(\sin \alpha \cos \beta')^{0,58}}{(\cos \beta')^{0,33} (\sin \beta')^{0,5}}$	

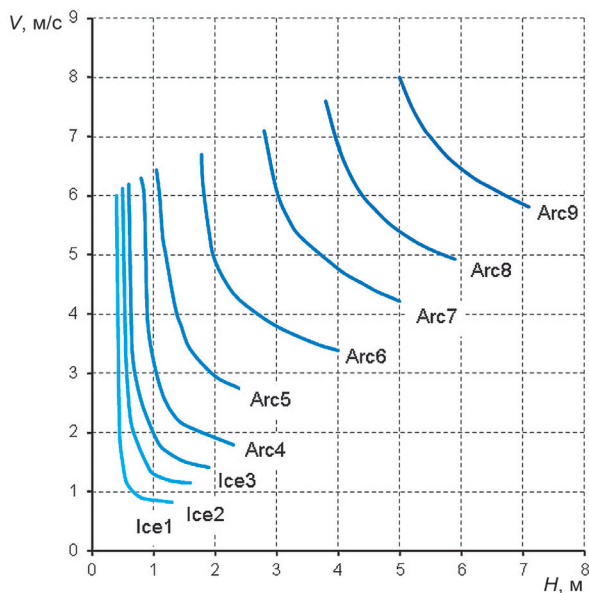


Рис. 2. Базовые опасные режимы движения для ледовых категорий Правил РМРС: V – скорость судна, H – толщина условно ровного льда
 Fig. 2. Basic dangerous navigation conditions for ice categories according to the RMRS Rules: V – vessel speed, H – conditionally level ice thickness

и т. п. Однако использование БОРД для регламентации ледовых нагрузок на корму СДД при движении кормой вперед представляется не совсем обоснованным. Все современные СДД оборудованы ВРК типа Aziprod или винторулевой колонкой. Поэтому при регламентации ледовых нагрузок на кормовую оконечность СДД следует учитывать не только прочность кормовой оконечности, но и ледовую прочность ВРК.

Это обстоятельство приводит к необходимости построения опасных режимов движения кормой вперед непосредственно для СДД. Для этого используется следующий подход:

- обоснование (с учетом эксплуатационных ограничений) допустимых режимов движения кормой вперед СДД с категориями ледовых усилений Ice1—Arc7;
- переход к опасным режимам с использованием коэффициента запаса прочности конструкций в соответствии с нормами методологии Ледовых правил РМРС;
- построение расчетных зависимостей для определения нагрузок на конструкции кормовой оконечности СДД с учетом уточненных формул для определения функций формы.

Согласно [13] для СДД при регламентации экстремальных нагрузок на ВРК скорость хода при движении кормой вперед во льдах ограничивается 5 уз. Для определения допустимой толщины льда некорректно ориентироваться на ледопробитность судна, поскольку удар о льдину на заднем ходу воз-

можен как при самостоятельном плавании во льдах, так и при маневрировании в канале, проложенном ледоколом. Здесь за основу может быть принята величина, имеющая физический смысл предельно допустимой эксплуатационной толщины льда для рассматриваемой ледовой категории.

Специальный анализ [12], проведенный при разработке действующих требований Правил РМРС к прочности конструкций ледовых усилений судов, позволил установить, что для типовых конструкций ледовых усилений характерно соотношение

$$\frac{q_{ult}}{q_{all}} \approx 1,8,$$

где q_{all} — ледовая нагрузка фибровой текущей, которая соответствует допустимому режиму эксплуатации; q_{ult} — предельная нагрузка, соответствующая опасному (предельному) режиму.

Тогда для перехода от допустимого режима к опасному (по значению скорости) из зависимостей для параметров ледовой нагрузки (2), полученных с использованием ГДМ, следует:

$$V_{ult} = V_{all} (1,8)^{\frac{8}{9}} = 1,69V_{all},$$

где V_{all} — скорость, соответствующая допустимому режиму движения.

В качестве толщины льда, соответствующей опасному режиму движения, следует выбирать удвоенное значение предельно допустимой эксплуатационной толщины льда для рассматриваемой ледовой категории, что позволит учесть возможные подсовы обломков ледяного поля:

$$H_{ult} = 2H_{all}.$$

Параметры допустимых и опасных режимов движения кормой вперед для СДД приведены в [8].

Регламентационные зависимости для параметров ледовой нагрузки на кормовой район СДД были построены на основании массовых расчетов ледовых нагрузок с использованием ГДМ в соответствии с описанными опасными режимами движения кормой вперед существующих проектов СДД с одним, двумя и тремя ВРК.

В табл. 8 приведены результаты расчета параметров ледовой нагрузки на корму существующих СДД: (1) — танкер с одним ВРК ледовой категории Arc7 водоизмещением около 25,5 тыс. т; (2) — танкер с двумя ВРК ледовой категории Arc6 водоизмещением около 92 тыс. т; (3) — танкер-газовоз с тремя ВРК ледовой категории Arc7 водоизмещением около 145 тыс. т. Эти данные демонстрируют хорошее согласование результатов расчетов погонной нагрузки, имеющей наибольшее влияние на размеры связей ледовых усилений, по разработанным зависимостям и прямым расчетам по ГДМ для построенных с учетом прочности ВРК опасных режимов движения кормой вперед.

Таблица 8. Пример расчета нагрузок на корму современных СДД

№	Условие	p , кПа	b , м	l_z , м	q , кН/м
(1)	Правила РМРС (корма считается как нос)	9820	1,01	11,26	9930
	ГДМ, опасный режим	5570	1,39	9,63	7740
	Новые зависимости	7790	0,95	9,81	7770
(2)	Правила РМРС (корма считается как нос)	4380	0,91	7,79	4010
	ГДМ, опасный режим	3540	0,79	4,68	2280
	Новые зависимости	3690	0,86	6,77	3170
(3)	Правила РМРС (корма считается как нос)	8020	0,96	10,55	7710
	ГДМ, опасный режим	4410	1,00	4,05	4390
	Новые зависимости	5960	0,90	6,28	5360

Методика определения ледовых нагрузок на участки носовой оконечности с вертикальным бортом

СДД в носовом районе могут иметь форму, не свойственную судам ледового плавания, — бульбовые обводы. Для носовых оконечностей судов с бульбовыми обводами корпуса для ледовой ватерлинии характерно наличие участка с вертикальным бортом, где угол наклона шпангоута очень мал или равен нулю. Причем суда арктических категорий характеризуются тупой формой носового бульба и протяженной зоной вертикального борта, доходящей до цилиндрической вставки, а суда арктических категорий характеризуются острой формой носового бульба и короткой зоной вертикального борта. Для таких участков носовой оконечности расчеты параметров ледовых нагрузок по зависимостям действующих Правил РМРС невозможны.

В [14] приведена аналитическая зависимость для определения контактного давления в функции от глубины внедрения ζ , полученная из решения дифференциального уравнения движения судна в направлении удара, для случая вертикального борта в точке контакта:

$$p = p_0 \left[1 - z f_1(\xi) \right]^{\frac{1}{7}} \left(\frac{\xi}{1 + \xi} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (25)$$

$$z = 0,118 \frac{H^{4,5} a_p^{1,2} C}{v_0^{1,75} MR l^{1,75}},$$

$$p_0 = 0,707 v_0^{1,25} a_p^{1,2} H^{0,5} l^{0,25},$$

где $a_p = f_a(H)$ — параметр динамической прочности льда на раздробление; $b = H = 2a$ — высота

зоны контакта; $C = f_c\left(\alpha, \frac{x}{L}\right)$ — коэффициент приведения массы; $\xi = \frac{8\zeta R}{H^2}$; ζ — глубина внедрения.

Полученное решение (25) показывает, что в случае вертикального борта невозможно выделить в явном виде параметры, характеризующие влияние массы судна и формы корпуса на параметры ледовой нагрузки, как это сделано при решении задачи об ударе наклонным бортом [2] (2)—(4).

Поэтому для построения зависимостей, определяющих расчетные ледовые нагрузки и функции влияния формы корпуса и водоизмещения судна на параметры ледовой нагрузки при ударе вертикальным бортом, предлагается использовать метод моделирования на основе аппарата планирования численного эксперимента [10]. Численным экспериментом являются результаты прямых расчетов параметров ледовой нагрузки с использованием ГДМ и кривой БОРД применительно к расчетной сетке судов с бульбовыми носовыми обводами и вертикальным бортом.

Разработаны следующая методика и алгоритм определения нагрузок на вертикальный борт [15]:

1. На основе статистических данных формируется расчетная сетка судов, которая определяет зависимость между главными размерениями и водоизмещением судна.

2. Выбираются независимо варьируемые параметры, от которых зависят значения параметров ледовой нагрузки. В качестве таких параметров принимаются:

- относительная абсцисса точки контакта корпуса

$$\text{судна со льдом } \frac{x}{L_{pp}};$$

- угол наклона ватерлинии в точке контакта α .

Для арктических категорий параметры формы корпуса варьируются в следующем диапазоне:

$$\alpha: 10 \div 30^\circ, \alpha_{\text{ср}} = 20^\circ,$$

$$\frac{x}{L}: 0,025 \div 0,075, \left(\frac{x}{L}\right)_{\text{ср}} = 0,05.$$

Для неарктических категорий в связи с протяженной зоной вертикального борта, доходящей до цилиндрической вставки, параметры формы корпуса варьируются в значительно более широком диапазоне:

$$\alpha: 5 \div 45^\circ; \alpha_{\text{ср}} = 25^\circ,$$

$$\frac{x}{L}: 0,025 \div 0,275, \left(\frac{x}{L}\right)_{\text{ср}} = 0,150.$$

3. Формируется матрица центрального композиционного планирования (см. выше) для прямого расчета ледовых нагрузок с использованием специализированного программного обеспечения, одобренного РМРС. При этом учитывается, что кривые БОРД (см. рис. 2), являясь осредненными кривыми опасных режимов движения расчетной сетки судов в рамках каждого класса, обладают следующими особенностями:

- кривая БОРД является огибающей кривых ледовой прочности, построенных для различных участков корпуса в районе носового заострения;
- крайняя правая точка, соответствующая минимальному значению скорости и наибольшей толщине льда (расчетный режим 10), определяется по предельной строительной прочности набора в самом носовом районе носового заострения —

$$\text{в районе } \frac{x}{L} \cong 0 \div (0,05 \div 0,1);$$

- при переходе к районам корпуса, расположенным ближе к переходу в цилиндрическую вставку, кривые БОРД смещаются в зону меньших толщин льда и больших скоростей, что связано с изменением формы корпуса и предельной строительной прочности по длине носового заострения;
- минимальная толщина льда и наибольшая скорость движения судна соответствуют крайней левой точке (расчетный режим 1).

Поэтому для арктических категорий значения V и H принимаются соответствующими 10-му режиму кривых БОРД для каждого ледового класса. Для неарктических категорий в связи с протяженной зоной вертикального борта рассматривается весь диапазон значений — V и H задаются для 1-го и 10-го режимов БОРД, а в качестве среднего принимается 5-й режим.

4. Расчет нагрузок в соответствии с матрицей планирования эксперимента для каждого водоизмещения из расчетных сеток арктических и неарктических судов.

5. Построение зависимостей ледового давления от водоизмещения судна при осредненных характеристиках параметров формы корпуса в районе с вертикальным бортом и среднего режима на кривой БОРД:

$$\bar{p}(\Delta) = p_{\text{ref}}(IC)C_p(\Delta),$$

где $p_{\text{ref}}(IC)$ — некоторое среднее давление, являющееся параметром класса.

6. Определение отклонения нагрузок от среднего значения для всех расчетных случаев.

7. Построение регрессионных моделей для коэффициентов, определяющих отклонение значений расчетного давления от среднего значения, за счет изменения параметров формы корпуса с использованием результатов планирования эксперимента для арктических и неарктических категорий:

$$v\left(\frac{x}{L}, \alpha\right) = b_0 + b_1 \frac{x}{L} + b_2 \alpha + b_{11} \left(\frac{x}{L}\right)^2 + b_{22} \alpha^2 + b_{12} \frac{x}{L} \alpha.$$

8. Построение регламентационных зависимостей в виде

$$p(\Delta) = p_{\text{ref}}(IC)C_p(\Delta)v\left(\frac{x}{L}, \alpha\right).$$

9. Построение зависимостей для других параметров ледовой нагрузки (высоты и длины зоны контакта) выполняется по аналогичному алгоритму.

На основании представленной методики построены регламентационные зависимости для определения параметров ледовой нагрузки на участки вертикального борта носовой оконечности СДД [15], представленные в табл. 9 и 10.

В табл. 11 приведены примеры расчета параметров ледовой нагрузки на основании прямых расчетных методов в рамках методологии действующих Правил РМРС и с использованием построенных зависимостей, где (1) — танкер ледовой категории Ice2 водоизмещением около 115 тыс. т, (2) — танкер ледовой категории Arc4 водоизмещением около 5,6 тыс. т, из которых видно, что погрешность вычисления по новым зависимостям в сравнении с прямым расчетом по БОРД не превосходит 4% для интенсивности ледовой нагрузки, 1% для высоты и 7,3% для длины зоны контакта. Таким образом, предложенные зависимости позволяют определять параметры ледовой нагрузки на участки вертикального борта в оконечностях СДД, а погрешность вычисления преимущественно не превышает допустимое значение 5%.

Таблица 9. Зависимости для параметров ледовой нагрузки на участки вертикального борта

Интенсивность ледовой нагрузки, кПа		
Ice1—Ice3	при $1 \leq \Delta \leq 5$ тыс. т	при $5 \leq \Delta \leq 200$ тыс. т
	$p_{AI}^{\text{верт}} = 0,9849 p_{ref}^i v_m \left(\frac{\Delta}{1000} \right)^{0,0132}$	$p_{AI}^{\text{верт}} = 0,9745 p_{ref}^i v_m \left(\frac{\Delta}{1000} \right)^{0,0052}$
Arc4—Arc7	$p_{AI}^{\text{верт}} = 0,7897 p_{ref}^i v_m \left(\frac{\Delta}{1000} \right)^{0,0614}$	
Высота зоны контакта, м		
Ice1—Ice3	$b_A^{\text{верт}} = b_{ref}^i u_{b-m}$	
Arc4—Arc7	$b = H$ для 10-й точки кривых БОРД	
Длина зоны контакта, м		
Ice1—Ice3	при $1 \leq \Delta \leq 5$ тыс. т	при $5 \leq \Delta \leq 200$ тыс. т
	$l_{z-A}^{\text{верт}} = 0,7478 l_{ref}^i u_{l-m} \left(\frac{\Delta}{1000} \right)^{0,3065}$	$l_{z-A}^{\text{верт}} = 0,2177 l_{ref}^i u_{l-m} \left(\frac{\Delta}{1000} \right)^{0,3311}$
Arc4—Arc7	$l_{z-A}^{\text{верт}} = 0,3373 l_{ref}^i u_{l-m} \left(\frac{\Delta}{1000} \right)^{0,2906}$	

Таблица 10. Значения параметров класса p_{ref}^i , b_{ref}^i , l_{ref}^i

Параметр	$1 \leq \Delta \leq 5$ тыс. т			$5 \leq \Delta \leq 200$ тыс. т			Arc4	Arc5	Arc6	Arc7
	Ice1	Ice2	Ice3	Ice1	Ice2	Ice3				
p_{ref}^i	1100	1430	1760	1120	1460	1810	3620	5910	10 360	16 020
b_{ref}^i	0,65	0,80	1,00	0,65	0,80	1,00	—	—	—	—
l_{ref}^i	3,66	4,33	4,27	12,05	14,22	13,94	4,55	4,52	4,39	4,23

Таблица 11. Пример расчетов нагрузок на участки вертикального борта тестовых судов

Параметр	(1)	(2)
p , кПа, прямой расчет	2620	3860
p , кПа, новые зависимости	2580	3710
ε , %	1,7	3,9
b , м, прямой расчет	1,60	—
b , м, новые зависимости	1,59	—
ε , %	0,6	—
l_z , м, прямой расчет	9,58	3,15
l_z , м, новые зависимости	9,18	2,92
ε , %	4,2	7,3

Закключение

В работе рассмотрены рекомендации по определению ледовых нагрузок на носовой район, включая бульбовые обводы и участки вертикального борта и кормовую оконечность, учитывающие разное количество установленных винторулевых комплексов.

Построенные новые функции формы для носовой оконечности современных судов ледового плавания (см. табл. 7) и зависимости для определения параметров ледовой нагрузки на участки с вертикальным бортом и бульбовыми обводами (см. табл. 9) были приняты Регистром и вошли в действующую редакцию главы 3.10 «Ледовые усиления судов ледовых классов и ледоколов» ч. II Правил РМРС.

Разработанные рекомендации по определению ледовых нагрузок на оконечности судов двойного действия (табл. 7 и 9) вошли в Новые требования Правил РМРС к конструкции ледовых усилений корпуса

судов, предназначенных для эксплуатации кормой вперед (глава 19 «Требования к конструкции ледовых усилений корпуса судов, предназначенных для эксплуатации кормой вперед» ч. XVII Правил РМРС).

Литература

1. Платонов В. В., Тряскин В. Н. Архитектурно-конструктивные особенности арктических судов двойного действия // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 3 (35). — С. 84—96. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-84-96.
2. Попов Ю. Н., Фаддеев О. В., Хейсин Д. Е., Яковлев А. А. Прочность судов, плавающих во льдах. — Л.: Судостроение, 1967. — 224 с.
3. Курдюмов В. А., Хейсин Д. Е. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед // Прикладная механика [Киев]. — 1976. — Ч. 12, вып. 10. — С. 103—109.
4. Курдюмов В. А., Тряскин В. Н., Хейсин Д. Е. Определение ледовой нагрузки и оценка ледовой прочности корпусов транспортных судов // Ледопроеходимость и ледовая прочность морских судов. — Л., 1979. — С. 3—12. — (Тр. ЛКИ).
5. Тряскин В. Н., Якимов В. В. Расчет допустимых скоростей движения судна во льдах для случая наклонного борта: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014618563. — [Б. м.], 2014.
6. Правила классификации и постройки морских судов. — Т. 1. — Ч. 2: «Корпус» / Рос. мор. регистр судоходства. — СПб., 2019.
7. Правила классификации и постройки морских судов. — Т. 1. — Ч. 2: «Корпус» / Регистр СССР. — Л., 1981.
8. Александров А. В., Платонов В. В., Тряскин В. Н. Разработка проекта требований Правил РМРС к конструкции ледовых усилений корпуса судов, предназначенных для эксплуатации кормой вперед // Науч.-техн. сб. Рос. мор. регистра судоходства. — 2018. — Дек., № 52/53. — С. 47—56.
9. Тряскин В. Н. Применение теории планирования эксперимента при проектировании конструкции корпуса судна // Проблемы проектирования корпусных конструкций: Сб. науч. тр. ЛКИ. — Л., 1987. — С. 26—35.
10. Тряскин В. Н. Методология автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна: Дис. ... д-ра техн. наук. — Разд. 3.2. — СПб., 2007.
11. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. — М.: Наука, 1965. — 340 с.
12. Апполонов Е. М. Ледовая прочность судов, предназначенных для круглогодичной арктической навигации. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2016. — 288 с.
13. Апполонов Е. М., Нестеров А. Б., Сазонов К. Е. Регламентация экстремальных ледовых нагрузок на корпуса азимутальных пропульсивных систем судов ледового плавания // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2008. — № 39. — С. 45—68.
14. Курдюмов В. А., Хейсин Д. Е. Определение нагрузок при ударе судна вертикальным бортом о кромку ледяного поля // Науч.-техн. сб. Регистра СССР. — 1984. — Вып. 14. — С. 3—10.
15. Апполонов Е. М., Платонов В. В., Тряскин В. Н. Методика нормирования ледовых нагрузок на конструкции носовой оконечности судов с вертикальным бортом и бульбовыми обводами // Тр. Крылов. гос. науч. центра. — 2019. — Спец. вып. 1. — С. 17—23.

Информация об авторах

Платонов Виктор Викторович, кандидат физико-математических наук, начальник сектора, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), e-mail: viktorplatonov@yandex.ru.

Тряскин Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3), e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Платонов В. В., Тряскин В. Н. Методические основы определения расчетных ледовых нагрузок на корпус современных судов ледового плавания в носовом и кормовом районах // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 83—98. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-83-98.

METHODOLOGICAL BASIS FOR DETERMINING THE DESIGN ICE LOADS ON THE HULL OF MODERN ICE VESSELS IN THE BOW AND STERN AREAS

Platonov V. V.

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

Tryaskin V. N.

State Marine Technical University (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on April 11, 2019

The hull structure of modern ice vessels has changed significantly compared with the vessels typical at the time of development of the current RMRS Rules. The use of existing approximations for the structure functions as applied to the modern structures of the DAS (double action ships) extremities quite often leads to large discrepancies with direct calculations by the method or by analytical dependencies. Particularly sensitive to the applied formulas are the areas of transition of the bow/stern ends to the cylindrical insert for vessels with vertical sides in the middle part, as well as the very bow/stern sections of the bow/stern areas, where the slopes of the frames and waterlines are maximal.

Upon the analysis of the hull structure features in the bow and stern areas of modern ice vessels including the DAS ones, an original method for constructing dependencies is proposed to determine the parameters of ice loads on the extremities of the vessels having an ice category of the Russian Maritime Register of Shipping. On the basis of the developed methodology, recommendations are made for determining design ice loads on bow and stern areas of double-acting ships further incorporated in the draft requirements of the RMRS Rules for the design of ice hull reinforcement for vessels intended to be operated astern.

Keywords: *Double-acting vessels, ice loads, Russian Maritime Registry of Shipping, Rules of the Russian Maritime Registry of Shipping.*

References

1. Platonov V. V., Tryaskin V. N. Arkhitekturno-konstruktivnye osobennosti arkticheskikh sudov dvoinogo deystviya. [Architectural and structural specific features of arctic double action ships]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2019, no. 3 (35), pp. 84—96. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-84-96. (In Russian).
2. Popov Yu. N., Faddeev O. V., Kheisin D. E., Yakovlev A. A. Prochnost' sudov, plavayushchikh vo l'dakh. [Strength of ships floating in ice]. Leningrad, Sudostroenie, 1967, 224 p. (In Russian).
3. Kurdyumov V. A., Kheisin D. E. Gidrodinamicheskaya model' udara tverdogo tela o led. [Hydrodynamic Model of Solid Body Impact on Ice]. *Prikladnaya mekhanika* [Kiev], 1976, pt. 12, iss. 10, pp. 103—109. (In Russian).
4. Kurdyumov V. A., Tryaskin V. N., Kheisin D. E. Opredelenie ledovoi nagruzki i otsenka ledovoi prochnosti korpusov transportnykh sudov. [Determination of Ice Load and Assessment of Ice Strength of Hulls of Transport Vessels]. *Ledoprokhodimost' i ledovaya prochnost' morskikh sudov*. Leningrad, 1979, S. 3—12. (Tr. LKI). (In Russian).
5. Tryaskin V. N., Yakimov V. V. Raschet dopustimyykh skorostei dvizheniya sudna vo l'dakh dlya sluchaya naklonnogo borta. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2014618563. [Calculation of permissible speed of the vessel in ice for the case of inclined side. Certificate of state registration of computer programs № 2014618563]. [S. I.], 2014. (In Russian).
6. Pravila klassifikatsii i postroiки morskikh sudov. [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships]. Vol. 1. Pt. 2: "Korpus". Ros. mor. registr sudokhodstva. St. Petersburg, 2019. (In Russian).
7. Pravila klassifikatsii i postroiки morskikh sudov. [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships]. Vol. 1. Pt. 2: "Korpus". Registr SSSR. Leningrad, 1981. (In Russian).
8. Aleksandrov A. V., Platonov V. V., Tryaskin V. N. Razrabotka proekta trebovaniy Pravil RMRS k konstruksii ledovykh usileniy korpusa sudov, prednaznachennykh dlya ekspluatatsii kormoi vpered. [Development of draft RS Rules requirements for hull ice strengthening of ships designed for astern operation]. *Nauch.-tekhn. sb. Ros. mor. registra sudokhodstva*, 2018, Dec., no. 52/53, pp. 47—56. (In Russian).
9. Tryaskin V. N. Primenenie teorii planirovaniya eksperimenta pri proektirovanii konstruksii korpusa sudna. [Application of the theory of experiment planning in the design of ship hull structures]. *Problemy proektirovaniya korpusnykh konstruksii: Sb. nauch. tr. LKI*. Leningrad, 1987, pp. 26—35. (In Russian).
10. Tryaskin V. N. Metodologiya avtomatizirovannogo proektirovaniya konstruksii korpusa sudna. [Methodology of computer-aided design of ship hull structures]. *Dis. ... d-ra tekhn. nauk. Razd. 3.2*. St. Petersburg, 2007. (In Russian).
11. Nalimov V. V., Chernova N. A. Statisticheskie metody planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov. [Statistical planning of extreme experiments].

cal methods of planning extreme experiments]. Moscow, Nauka, 1965, 340 p. (In Russian).

12. Appolonov E. M. Ledovaya prochnost' sudov, prednaznachennykh dlya kruglogodichnoi arkticheskoi navigatsii. [Ice Strength of Vessels Designed for Year-round Arctic Navigation]. St. Petersburg, Izd-vo SPbG-MTU, 2016, 288 p. (In Russian).

13. Appolonov E. M., Nesterov A. B., Sazonov K. E. Reglamentatsiya ekstremal'nykh ledovykh nagruzok na korpuse azimutal'nykh propul'sivnykh sistem sudov ledovogo plavaniya. [Regulation of extreme ice loads on the hull of azimuth propulsion systems of ice navigation vessels]. Tr. TsNII im. akad. A. N. Krylova, 2008, no. 39, pp. 45—68. (In Russian).

14. Kurdyumov V. A., Kheisin D. E. Opredelenie nagruzok pri udare sudna vertikal'nym bortom o kromku ledyanogo polya. [Determination of loads on impact of the vessel vertical side on the edge of the ice field]. Nauch.-tekhn. sb. Registra SSSR, 1984, iss. 14, pp. 3—10. (In Russian).

15. Appolonov E. M., Platonov V. V., Tryaskin V. N. Metodika normirovaniya ledovykh nagruzok na konstruksii nosovoi okonechnosti sudov s vertikal'nym bortom i bul'bovymi obvodami. [Ice load assignment procedure for bows of ships with vertical sides and bulbous lines]. Tr. Krylov. gos. nauch. tsentra, 2019, special. iss. 1, pp. 17—23. (In Russian).

Information about the authors

Platonov Viktor Viktorovich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Head of Section, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), e-mail: viktorplatonov@yandex.ru.

Tryaskin Vladimir Nikolaevich, Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Department, Ship Structure and Operation Department, State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, Russia, 190121), e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru.

Bibliographic description

Platonov V. V., Tryaskin V. N. Methodological basis for determining the design ice loads on the hull of modern ice vessels in the bow and stern areas. Arctic: Ecology and Economy, 2019, no. 4 (36), pp. 83—98. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-83-98. (In Russian).

© Platonov V.V., Tryaskin V.N., 2019