

Е.М. Апполонов<sup>1</sup>, В.В. Платонов<sup>2</sup>, В.Н. Тряскин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АО «ЦКБ «Лазурит», Нижний Новгород, Россия

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

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ПРАВИЛ РЕГИСТРА К ЛЕДОВЫМ УСИЛЕНИЯМ СУДОВ И ЛЕДОКОЛОВ

**Объект и цель научной работы.** Объектом теоретических исследований и расчетного анализа являются требования Правил Регистра к ледовым усилениям судов ледового плавания и ледоколов.

**Материалы и методы.** При определении расчетных ледовых нагрузок используется модель динамического разрушения льда, описывающая сложный процесс одновременного силового раздробления и динамического вытеснения льда, и согласующаяся с современными экспериментальными данными по разрушению льда при местном смятии.

**Основные результаты.** Разработаны Предложения по совершенствованию действующих требований Правил Регистра к ледовым усилениям судов и ледоколов в части регламентации расчетных ледовых нагрузок, обеспечивающие обоснованную экстраполяцию накопленного опыта обеспечения ледовой прочности на перспективные крупнотоннажные суда ледового плавания и мощные ледоколы.

**Заключение.** При определении ледовых нагрузок осуществлен переход от гидродинамической модели к прогрессивной модели динамического разрушения льда, адекватно описывающей современные экспериментальные данные об особенностях разрушения льда. На основании новой модели построена новая система регламентационных зависимостей для определения расчетных ледовых нагрузок. Выполнено согласование требований к прочности конструкций ледовых усилениям судов различных ледовых классов на основе согласования соответствующих величин расчетных ледовых нагрузок. При переходе к разработанным Предложениям при сохранении неизменным общего уровня требований к ледовой прочности достигается снижение расчетных ледовых нагрузок и, как следствие, металлоемкости конструкций ледовых усилениям для перспективных в настоящее время крупнотоннажных судов и ледоколов нового типа.

**Ключевые слова:** Российский морской регистр судоходства, Правила, ледовые нагрузки, гидродинамическая модель, модель динамического разрушения льда.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Апполонов Е.М., Платонов В.В., Тряскин В.Н. Совершенствование требований Правил Регистра к ледовым усилениям судов и ледоколов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 3(385): 18–28.

УДК 629.5.011:629.5.021.18

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-18-28

E.M. Appolonov<sup>1</sup>, V.V. Platonov<sup>2</sup>, V.N. Tryaskin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lazurit Central Design Bureau, Nizhny Novgorod, Russia

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

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

## IMPROVEMENT OF RMRS ICE STRENGTHENING REQUIREMENTS FOR ICE CLASS VESSELS AND ICEBREAKERS

**Object and purpose of research.** The object of this background research and design analysis are the ice strengthening requirements of the Russian Register Rules for ice class vessels and icebreakers.

**Materials and methods.** Design ice loads are determined using a dynamic model of ice failure, which describes a complicated process of simultaneous ice crushing and dynamic ice displacement. This model is in agreement with up-to-date experimental data on ice failure mechanism under local crushing effect.

**Main results.** Proposals were developed to improve the ice-strengthening requirements of current RMRS Rules for ice class vessels and icebreakers, in particular regulation of design ice loads, to ensure well-grounded extrapolation of previously gained expertise in structural strength of ice-going vessel to cover prospective large-size ice-class vessels and powerful icebreakers.

**Conclusion.** The hydrodynamic model of ice load estimation is substituted by the progressive dynamic ice-failure model to provide adequate description of up-to-date experimental data on specific ice failure features. This new model is used to generate a new system of regulatory equations for determination of design ice loads. Due to implementation of these new proposals the design ice loads are expected to be reduced, while the overall ice strength requirements are maintained at the same level, with savings in the metal consumption required to ensure the ice strengthening of economically attractive large-size carriers and new type icebreakers.

**Key words:** Russian Maritime Register of Shipping, Rules, ice loads, hydrodynamic model, dynamic ice failure model.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Appolonov E.M., Platonov V.V., Tryaskin V.N. Improvement of RMRS ice strengthening requirements for ice class vessels and icebreakers. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 3(385): 18–28 (in Russian).

UDC 629.5.011:629.5.021.18

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-18-28

## Введение

### Introduction

Действующие требования Правил Регистра к ледовым усилениям судов и ледоколов (Ледовые правила) были разработаны в конце 90-х гг. прошлого века под руководством Е.М. Апполонова и прошли почти 20-летнюю практическую апробацию [1]. Успешно эксплуатируются, в том числе на трассах Северного морского пути, контейнерные суда типа «Норильский никель» (Агс7), танкеры типа «Василий Динков» (Агс6) и «Михаил Ульянов» (Агс6), дизель-электрические ледоколы типа «Москва» (Icebreaker6), НЭС «Академик Трешников» (Агс7). В настоящее время достраиваются плавучий энергоблок «Академик Ломоносов» (Агс5), атомный универсальный двухосадочный ледокол пр. 22220 (Icebreaker9), дизель-электрические ледоколы пр. 21900М (Icebreaker6), пр. 22600 (Icebreaker8) и др.

Анализ опыта эксплуатации судов ледового плавания и ледоколов, спроектированных на ледовый класс действующих Правил РС, выполненный совместно с ЦНИИМФ [2], показал, что данные о ледовой повреждаемости носят единичный характер, и в целом уровень ледовой прочности, заложенный в действующие Ледовые правила, является удовлетворительным. Однако, с другой стороны, анализ научно-теоретической основы действующих Ледовых правил позволил сделать вывод, что гидродинамическая модель (ГДМ), используемая при определении расчетных ледовых нагрузок в действующих Правилах, существенно переоценивает роль процесса динамического вы-

теснения разрушенного льда за пределы зоны контакта и игнорирует процесс силового разрушения льда. Как следствие, ГДМ дает существенное влияние на ледовую нагрузку скорости и массы судна, что сказывается, прежде всего, при экстраполяции накопленного опыта регламентации ледовой прочности судов малых и средних размеров и средних ледовых классов на перспективные крупнотоннажные суда, суда высоких арктических категорий и ледоколы нового типа.

Для исключения этого недостатка и совершенствования требований Ледовых правил ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (КГНЦ) совместно с ЗАО «ЦНИИМФ» и СПбГМТУ была поставлена и выполнена научно-исследовательская работа (НИР) «Разработка новой редакции требований Правил Российского морского регистра судоходства (РМРС) к обеспечению прочности судов ледового плавания и ледоколов» по государственному контракту с Минпромторгом России в рамках Государственной программы «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013–2030 годы». Постановка данной темы была предварительно обсуждена на совещании в КГНЦ с участием ФГУП «Атомфлот», ЦКБ Айсберг и другими заинтересованными предприятиями, занимающимися проектированием, строительством и эксплуатацией судов ледового плавания и ледоколов.

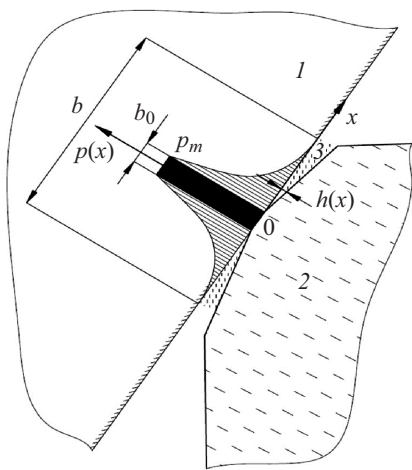
Основные результаты выполненных исследований и разработанные на их основе Предложения по совершенствованию требований действующих Ледовых правил (далее Предложения) рассматриваются в настоящей статье.

## Модель динамического разрушения льда

### Dynamic ice failure model

В 80–90-е гг. в Канаде были проведены эксперименты по сбрасыванию полусферических грузов на лед, получившие название Drop Ball Tests (DBT) [3, 4]. В рамках данных экспериментов проводились замеры давлений в нескольких точках полусферы, показавшие, что эпюра давлений имеет не пологую, а выраженную пиковую форму. Аналогичные результаты были получены в серии экспериментов по внедрению в лед среднemasштабных инденторов [5], а также натуральных испытаний судов во льдах, оснащенных специальной системой для построения эпюры давлений в зоне контакта корпуса со льдом. В апреле-мае 1998 г. комплексные исследования динамической прочности льда на основе DBT были осуществлены КГНЦ в рамках международного проекта ARCDEV [6]. На основании расчетного анализа результатов экспериментов была подтверждена качественная картина разрушения льда при динамическом смятии и даны количественные оценки параметров пиковости эпюры ледовых давлений.

Анализ результатов этих экспериментов позволил установить следующую качественную картину



**Рис. 1.** Модель динамического разрушения льда (зона контакта вытянута вдоль борта судна): 1 – твердое тело (борт судна); 2 – ледовое поле; 3 – промежуточный слой разрушенного мелкодисперсного льда

**Fig. 1.** Model of dynamic ice failure (contact area stretching along ship side): 1 – solid body (ship side); 2 – ice field; 3 – intermediate layer of finely dispersed ice

разрушения льда при местном смятии. Вдоль продольной оси симметрии вытянутой зоны контакта располагается относительно небольшая по ширине область прямого контакта внедряемого тела со льдом. По обе стороны от области прямого контакта располагаются области разрушенного (мелкодисперсного) льда, вытеснявшегося в процессе внедрения тела в лед. Давления в зоне контакта имеют четко выраженный пик в области прямого контакта и быстро убывают в пределах области вытеснения разрушенного льда.

Согласно изложенной физической картине максимальные давления реализуются в области, где промежуточный слой отсутствует, а с увеличением толщины промежуточного слоя давления уменьшаются. В рамках ГДМ имеет место обратная ситуация: максимальные давления возникают в области максимальной толщины промежуточного слоя.

На основании изучения изложенных экспериментальных данных и существующих нормативных требований при разработке унифицированных требований МАКО для полярных судов была сформулирована модель динамического разрушения льда при местном смятии (МДРЛ) [7, 8]. МДРЛ дает наблюдаемую в экспериментах пикообразную эпюру давлений. В ее рамках по сравнению с ГДМ ослабляется влияние скорости и массы судна на параметры ледовой нагрузки.

Существенное развитие МДРЛ было обеспечено в работах по НИР «Разработка новой физической модели удара корпуса судна о лед, учитывающей последние отечественные и зарубежные экспериментальные данные, и создание на этой основе новой методологии регламентации ледовой прочности с целью повышения надежности плавучих добычных комплексов, хранилищ, судов ледового плавания и ледоколов. Разработка прогрессивных методов оценки и нормирования вибрации ледоколов и судов ледового плавания» (шифр «Модель»), выполнявшихся по ФЦП «Развитие гражданской морской техники на 2009–2016 годы» [9, 10].

Для вытянутой вдоль борта судна зоны контакта, реализуемой при ударе корпуса судна о лед, МДРЛ приводит к следующим расчетным зависимостям (рис. 1):

В области прямого контакта тела со льдом (при  $x \leq b_0/2$ ), расположенной в центре зоны контакта, ледовое давление постоянно и равно  $p_m$ :

$$p(x) = p_m.$$

Ледовое давление в зоне вытеснения (на участке  $b_0/2 < x < b/2$ ) монотонно убывает по закону

$$p(x) = \left[ p_m - \frac{2Av}{b} \left( \frac{b}{b_0} - 1 \right) \right] \frac{\left( \frac{b}{2x} \right)^2 - 1}{\left( \frac{b}{b_0} \right)^2 - 1} + \frac{2Av}{b} \left( \frac{b}{2x} - 1 \right),$$

где  $A = 3\mu/k^3$  – параметр МДРЛ;  $\mu$  – коэффициент внутреннего трения;  $k$  – коэффициент конфигурации промежуточного слоя;  $v$  – мгновенная скорость внедрения тела в лед;  $x$  – координата.

Погонная ледовая нагрузка определяется по формуле

$$q = q_p + q_v,$$

где  $q_p = p_m b \alpha_p$ ;  $q_v = v_n A \alpha_v$ ;

$$\alpha_p(\bar{b}_0) = \alpha_p = \frac{2\bar{b}_0}{(1 + \bar{b}_0)};$$

$$\alpha_v(\bar{b}_0) = \alpha_v = -2 \left( \frac{2(1 - \bar{b}_0)}{(1 + \bar{b}_0)} + \ln(\bar{b}_0) \right); \quad \bar{b}_0 = \frac{b_0}{b};$$

$q_p$  – составляющая погонной нагрузки, создаваемая процессом разрушения (раздробления) льда;  $q_v$  – составляющая погонной нагрузки, обусловленная процессом вытеснения раздробленного льда за пределы зоны контакта.

## Методика регламентации расчетных ледовых нагрузок на основании модели динамического разрушения льда

Method for regulation of design ice load based on dynamic ice failure model

При разработке настоящих Предложений по совершенствованию Ледовых правил МДРЛ была доведена до практической методики регламентации расчетных ледовых нагрузок, включившей следующие проработки, прежде всего, в отношении способов задания ее параметров  $p_m$ ,  $\bar{b}_0$  и  $A$  [11]:

- выполнено уточнение относительного размера зоны прямого контакта как переменной, изменяющейся в процессе внедрения борта судна в лед;
- введена связь максимального давления в зоне прямого контакта  $p_m$  с пределом прочности льда на сжатие  $\sigma_{сж}$ ;

- введен учет влияния масштабного эффекта на относительный размер зоны прямого контакта и величину среднего давления по площади зоны контакта, базирующегося на эмпирической модели pressure-area, характеризующего относительное уменьшение среднего давления по площади зоны контакта в зависимости от относительной площади зоны контакта;
- выполнено уточнение зависимостей МДРЛ при малых углах наклона борта;
- выполнена регламентация параметра вытеснения раздробленного льда за пределы зоны контакта.

Усовершенствованная МДРЛ и разработанная на ее основе методика определили расчетно-теоретическую базу для построения новой системы регламентационных зависимостей для определения расчетных ледовых нагрузок и согласования требований к прочности конструкций ледовых усилений судов различных ледовых классов.

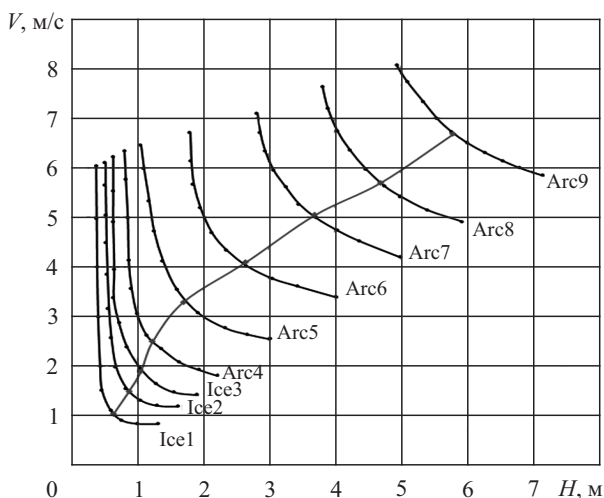
## Новая система регламентационных зависимостей для расчетных ледовых нагрузок

Updated system of regulatory equations for design ice loads

Построение новой системы зависимостей для определения расчетных ледовых нагрузок, ориентированной на использование в перспективных Ледовых правилах, должно осуществляться с учетом научно-методической основы требований действующих Правил РС к ледовой прочности и ледовой классификации [6]. Совместный анализ основных положений действующих Ледовых правил и усовершенствованной МДРЛ позволил предложить следующую принципиальную концепцию построения зависимостей для расчетных ледовых нагрузок:

1. Отсутствует необходимость кардинального пересмотра заложенной в требования действующих Ледовых правил методологии нормирования, оценки прочности и проектирования конструкций ледовых усилений.
2. Регламентируемые действующими Ледовыми правилами уровни прочности и допускаемые условия ледового плавания ледовых классов должны быть приняты за основу при построении новой системы зависимостей для расчетных ледовых нагрузок.

3. При расчетном определении ледовых нагрузок должен быть выполнен переход от ГДМ к прогрессивной МДРЛ, согласующейся с современными экспериментальными данными и описывающей сложный процесс раздробления и вытеснения льда.
4. Поскольку блок действующих Ледовых правил, касающийся критериев прочности и требований к размерам конструкций ледовых усилений, в целом сохраняется неизменным, условием согласования уровней прочности ледовых классов будет являться согласование соответствующих величин расчетных ледовых нагрузок.
5. Переход от ГДМ к МДРЛ приводит к изменению характера зависимости ледовой нагрузки от размерений судна, характеризуемых в первую очередь длиной/водоизмещением. Поэтому условие согласования величин расчетных нагрузок должно выполняться для размерений судов, опыт эксплуатации которых был в наибольшей степени учтен при разработке действующих Ледовых правил. Этому соответствует диапазон длин судов 100–130 м. Для перспективных в настоящее время крупнотоннажных судов следует ожидать снижения расчетных ледовых нагрузок по сравнению с уровнем действующих Ледовых правил.
6. Каждому ледовому классу действующих Правил РС соответствует единая кривая «скорость – толщина льда», ассоциированная с критерием



**Рис. 2.** Выбор параметров режима движения ( $V_i, H_i$ ) на кривых базового опасного режима движения  
**Fig. 2.** Choice of sailing mode ( $V_i, H_i$ ) based on the baseline curves of dangerous modes

7. В ГДМ в качестве основной характеристики прочности льда используется параметр динамической прочности льда на раздробление  $a_p$ . Расчетные значения  $a_p$  устанавливались на основании оценок параметров ледовой прочности с использованием ГДМ удара твердого тела о лед и их нормирования с учетом существующего опыта эксплуатации судов ледового плавания различных ледовых классов [12]. Переход от ГДМ к МДРЛ приводит к введению в зависимости для ледовой нагрузки в качестве основной характеристики предела прочности льда на сжатие  $\sigma_{сж}$ . Нормирование  $\sigma_{сж}$  должно осуществляться на основе накопленных экспериментальных данных и с учетом заложенных в Правила РС и других классификационных обществ уровней расчетных ледовых нагрузок для судов арктических классов и подходов к нормированию прочности льда на сжатие и изгиб. В частности, имеется хорошее согласование с нормативными параметрами прочности льда, принятыми в правилах DNV [13] и УТ МАКО [14] (отметим, что в УТ МАКО нормируется параметр кривой «давление – площадь», связанный с пределом прочности льда на сжатие  $p_0$ , установленными в МДРЛ зависимостями).

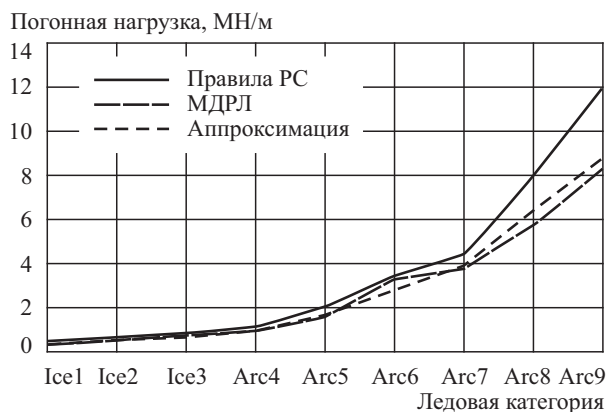
В принятой регламентационной зависимости для предела прочности льда на основании анализа данных современных экспериментальных исследований учитываются влияния скорости деформаций [15, 16], изменчивости поля температур по толщине льда [17] и направления нагружения на предел прочности льда на сжатие [17].



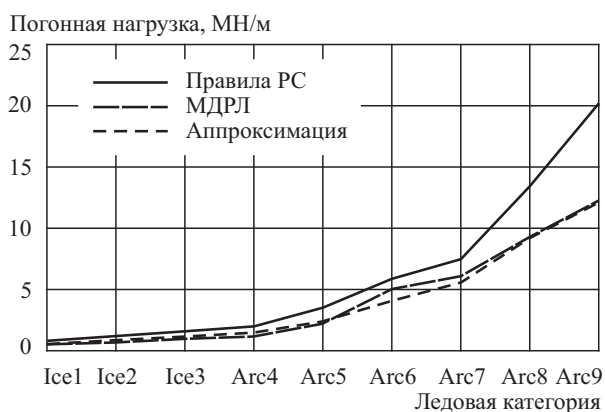
Выполнение расчетного анализа параметров ледовой нагрузки и построение системы регламентационных зависимостей осуществляется на основании множественных расчетов представительной сетки судов всех ледовых классов. Разработанная сетка характеризуется широким диапазоном варьирования длин судов от 50 до 300 м (в том числе в рассмотрение включены перспективные крупнотоннажные суда высоких ледовых классов); учтено изменение формы обводов в зависимости от длины судна и его ледового класса. Отдельно рассмотрены суда нетрадиционной для действующих Ледовых правил формой корпуса.

Результаты массовых расчетов параметров ледовой нагрузки представлены на рис. 3. Анализ результатов показывает, что погонная ледовая нагрузка, рассчитанная по МДРЛ, монотонно изменяется, увеличиваясь с ростом водоизмещения и с увеличением ледового класса. Полученные результаты в полной мере соответствуют принятой мировой практике нормирования прочности конструкций ледовых усилений арктических судов. Сопоставление результатов расчета по МДРЛ с расчетами по действующим Правилам показывает хорошее согласование погонных нагрузок для судов таких размеров и ледовых классов, по которым существует значительный опыт эксплуатации (средние категории ледовых усилений, средняя тоннажность). Применение МДРЛ приводит к существенному снижению ледовой нагрузки для крупнотоннажных и среднетоннажных судов низких ледовых категорий и крупнотоннажных судов высоких ледовых категорий. Так, для судов ледового плавания неарктических и средних арктических категорий в диапазоне длин до 130 м снижение расчетных ледовых нагрузок составляет не более 10 %. Для перспективных крупнотоннажных судов и судов высоких ледовых классов снижение расчетных ледовых нагрузок может достигать 25–30 %. Для ледоколов нового типа (категории Icebreaker9, большого водоизмещения и мощности) снижение расчетных ледовых нагрузок также достигает 25–30 %. Поэтому скорейшее внедрение разработанных Предложений обеспечит создание эффективных мощных арктических ледоколов и крупнотоннажных арктических судов для обеспечения перевозок на трассах Северного морского пути.

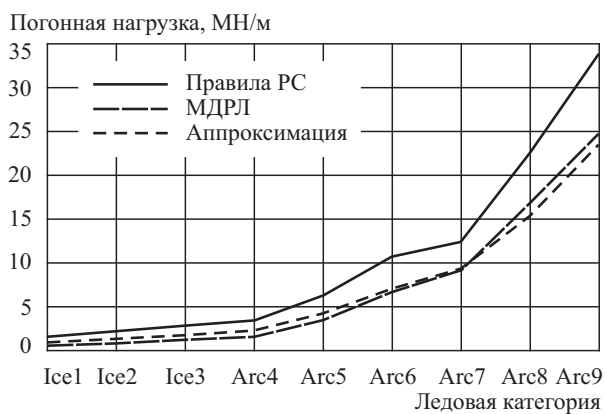
Для полученных результатов прямых расчетов параметров ледовой нагрузки по МДРЛ выполнено обобщение и построены аппроксимационные зависимости непосредственно для использования в перспективных Ледовых правилах. Аппроксимацион-



а)



б)



в)

**Рис. 3.** Примеры результатов расчета погонной ледовой нагрузки для некоторых длин судов из рассмотренной сетки: а) 100 м; б) 170 м; в) 250 м

**Fig. 3.** Case study: estimation of ice loads per unit lengths of ship hulls under consideration: а) 100 m; б) 170 m; в) 250 m

ные зависимости были построены для параметров нагрузки  $p$ ,  $b$ ,  $l^H$ , которые зависят от:

- ледового класса;
- водоизмещения;
- параметров формы корпуса в рассматриваемом сечении.

На основании анализа эпюр параметров ледовой нагрузки, полученных с использованием прямых расчетов по МДРЛ, итоговые аппроксимационные зависимости для каждого из параметров ледовой нагрузки были представлены в следующем общем виде:

$$p/b/l^H = a_i \cdot \Delta^{K_\Delta} \cdot \alpha^{K_\alpha} \cdot \beta^{K_\beta} \times \left( k_0 + k_1 \left( \frac{x}{L} \right) + k_2 \left( \frac{x}{L} \right)^2 + k_3 \left( \frac{x}{L} \right)^3 + k_4 \left( \frac{x}{L} \right)^4 \right),$$

где  $a_i$  – параметр ледового класса;  $\Delta$  – водоизмещение;  $x/L$  – относительная абсцисса расчетного сечения носового района носового заострения на уровне расчетной ватерлинии;  $\alpha$  – угол наклона ватерлинии в рассматриваемом сечении;  $\beta$  – угол наклона шпангоута в рассматриваемом сечении;  $K_\Delta$ ,  $K_\alpha$ ,  $K_\beta$ ,  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  – параметры, значения которых обоснованы в [11]. Примеры расчетов по аппроксимационным зависимостям приведены на рис. 3.

**Таблица.** Снижение металлоемкости основных конструктивных элементов ледовых усилений при расчете нагрузок по разработанным Предложениям по сравнению с действующими Правилами РМРС, %

**Table.** Savings in metal consumption related to ice strengthening to be gained if ice loads are estimated as per the new Proposal (in percentage as compared to the current RMRS Rules)

Категория	Обыкновенный шпангоут	Рамный шпангоут	Обшивка	Общая
Ice2, 100 м	5,7	6,9	1,5	4,0
Ice2, 250 м	33,5	31,4	5,4	19,1
Arc4, 100 м	5,25	6,5	3,0	4,0
Arc4, 250 м	25,1	21,4	3,7	10,2
Arc7, 100 м	5,0	6,6	0,3	3,0
Arc7, 250 м	20,6	22,4	1,4	11,5
Arc9, 100 м	15,9	20,4	6,4	12,1
Arc9, 250 м	24,7	28,0	18,1	20,1
Icebreaker6, 62 м	12,1	15,2	3,0	8,1
Icebreaker7, 112 м	6,7	11,2	2,5	5,0
Icebreaker8, 130 м	16,2	16,8	10,5	13,0
Icebreaker9, 188 м	26,4	28,0	21,7	20,8

## Оценка металлоемкости конструкции ледовых усилений

Metal consumption related ice strengthening

Для разработанных Предложений и действующих Ледовых правил был выполнен сопоставительный анализ металлоемкости конструкций ледовых усилений (КЛУ) как отдельных элементов (обыкновенного и рамного шпангоутов, несущего стрингера и наружной обшивки), так и общей металлоемкости КЛУ. Анализ показал, что для перспективных крупнотоннажных судов ледового плавания и ледоколов нового типа при переходе от действующих Правил к разработанным Предложениям обеспечивается снижение общей металлоемкости КЛУ ориентировочно на 20 % (см. табл.).

## Корректировка требований к форме корпуса и районированию ледовых усилений

Updated requirements regarding the hullform and ice-strengthened hull areas

Наряду с совершенствованием системы зависимостей для определения ледовых нагрузок на основании анализа современного опыта проектирования судов ле-

догового плавания и ледоколов были разработаны предложения по совершенствованию подходов регламентации ледовых нагрузок и районированию ледовых усилений, используемых непосредственно в действующих Ледовых правилах. Прежде всего, исключены ограничения на диапазоны углов наклона ватерлинии и шпангоутов для носовой оконечности судов ледового плавания и ледоколов (таблицы 3.10.1.2.2 и 3.10.1.2.3 Правил РС [1]), регламентирующие применение приближенных зависимостей Правил для параметров расчетных ледовых нагрузок.

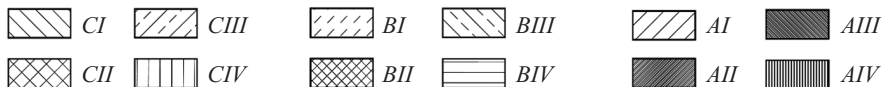
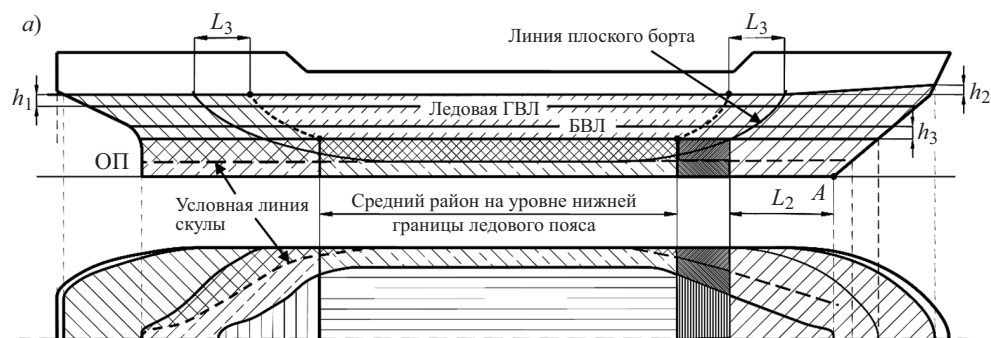
Исключение данных ограничений потребовало выполнения корректировки требований к районированию ледовых усилений. Анализ и сопоставление требований Правил различных классификационных обществ в части расположения районов ледовых усилений и обобщение отечественного опыта проектирования современных судов и ледоколов позволили сформулировать следующие рекомендации по корректировке требований Ледовых правил в части положения и протяженности районов ледовых усилений:

1. Нормирование расчетных нагрузок целесообразно производить с учетом формы корпуса не только на уровне ватерлинии в полном грузу, но

и на уровне минимальной эксплуатационной ватерлинии (ватерлинии в балластном плавании).

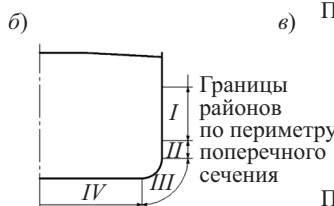
2. Протяженность носового и кормового районов ледовых усилений рекомендуется согласовывать с положением линии плоского борта. Положение кормовой границы носового района и носовой границы среднего района относительно линии плоского борта должно определяться значением параметра  $L_3$ , которое зависит от категории ледовых усилений. Это требование должно выполняться не только на уровне верхней эксплуатационной ватерлинии, но и на уровне нижней (рис. 4).

3. Протяженность ледового пояса в носовом районе днища, которая регламентируется параметром  $L_2$ , вероятно, слишком завышена для судов, имеющих ледокольную форму носовой оконечности с малыми углами наклона форштевня к ОП. Такое требование может привести к распространению ледового пояса с соответствующими расчетными ледовыми нагрузками на участок протяженностью более  $0,25L_{pp}$  от носового перпендикуляра ( $L_{pp}$  – длина судна между перпендикулярами). Рекомендуется требование сохранить, но ввести ограничение на протяженность ледового пояса



**Рис. 4.** Районы ледовых усилений судов ледовых классов:  
I – ледовый пояс в районе переменных осадок;  
II – от нижней кромки района I до верхней кромки района III;  
III – скуловой пояс;  
IV – плоское днище

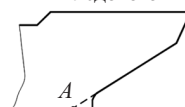
**Fig. 4.** Hull ice strengthening areas for ice class vessels:  
I – ice belt in variable draft area;  
II – lower edge of hull area I to upper edge of hull area III;  
III – bilge belt; IV – flat bottom



б) Положение точки A для бульбовой формы носовой оконечности



в) Положение точки A при наличии ледового выступа





в носовом районе днища: не далее, чем до сечения  $0,25L_{pp}$  от носового перпендикуляра. Переходный участок  $2h_4$  убрать и закончить участок  $L_2$  вертикальной линией от диаметральной плоскости до нижней границы ледового пояса (рис. 4).

Для ледоколов, имеющих цилиндрическую вставку с вертикальным бортом, положение носового, среднего и кормового районов ледовых усилений также задаются относительно линии плоского борта аналогично судам ледового плавания. Для ледоколов высоких ледовых классов, не имеющих цилиндрической вставки, протяженность районов ледовых усилений рекомендуется определять традиционным способом в долях от длины корпуса.

## Корректировка требований к надбавке на коррозию

Updated corrosion allowance requirements

В рамках совершенствования требований к надбавке на коррозию в ЦНИИМФ был выполнен анализ отечественных и зарубежных данных по состоянию корпусов ледоколов и судов ледового плавания во время докования, на которых применялась электрохимическая защита (ЭХЗ) и/или защита на основе ледостойких лакокрасочных покрытий (ЛКП). На основании выполненного анализа установлено [18], что скорости коррозии/эрозии для судов ледового плавания и ледоколов снижаются в 2 раза при применении эффективных средств защиты по сравнению с судами, не имеющими эффективных средств защиты. При применении плакированной стали в качестве эффективного метода защиты коррозии/эрозии в районе ледовых усилений отсутствует.

Таким образом, была предложена следующая корректировка требований к надбавке на коррозию и эрозию:

- при применении ЭХЗ и защиты на основе ледостойких ЛКП значение среднегодового износа толщины наружной обшивки может быть уменьшено в два раза;
- при использовании плакированной стали надбавку на коррозию и эрозию можно исключить.

## Заключение

Conclusion

На основе теоретических исследований и расчетного анализа разработаны Предложения по

совершенствованию требований Правил РМРС к ледовым усилениям судов ледового плавания и ледоколов:

1. Осуществлен переход от ГДМ к прогрессивной модели динамического разрушения льда, описывающей сложный процесс одновременного силового раздробления и динамического вытеснения льда и согласующейся с современными экспериментальными данными по разрушению льда при местном смятии.
2. Построена новая система регламентационных зависимостей для определения расчетных ледовых нагрузок.
3. Выполнено согласование требований к прочности конструкций ледовых усилений судов различных ледовых классов на основе согласования соответствующих величин расчетных ледовых нагрузок.
4. При переходе к требованиям настоящих Предложений при сохранении неизменным общего уровня требований к ледовой прочности достигается снижение ледовых нагрузок для:
  - перспективных крупнотоннажных судов;
  - судов высших ледовых категорий Arc8 и Arc9;
  - ледоколов нового типа, включая 120 МВт ледокол «Лидер».
5. При переходе к разработанным Предложениям для перспективных в настоящее время крупнотоннажных судов и ледоколов нового типа снижение металлоемкости конструкций ледовых усилений составит около 20 %.
6. На основании анализа современного опыта проектирования выполнена корректировка требований к форме корпуса судов ледового плавания и ледоколов:
  - исключены ограничения таблиц 3.10.1.2.2 и 3.10.1.2.3 на диапазоны углов, регламентирующих применение приближенных зависимостей Правил для параметров расчетных ледовых нагрузок;
  - откорректированы требования к расположению границ зон ледовых усилений.
7. Выполнена корректировка требований к надбавке на коррозию и эрозию:
  - при применении ЭХЗ и защиты на основе ледостойких ЛКП значение среднегодового износа толщины наружной обшивки может быть уменьшено в два раза;
  - при использовании плакированной стали надбавку на коррозию и эрозию можно исключить.

Новая МДРЛ и разработанные на ее основе Предложения обеспечивают обоснованную экстраполяцию накопленного опыта регламентации ледовой прочности на перспективные крупнотоннажные суда ледового плавания и мощные ледоколы. Результаты работы прошли обсуждение с конструкторскими бюро, занимающимися проектированием судов ледового плавания и ледоколов, изложены на заседании секции «Прочность и конструкция морских судов и плавучих сооружений» НТС РС и представлены на рассмотрение в РС.

Скорейшее внедрение разработанных Предложений обеспечит создание эффективных мощных арктических ледоколов и крупнотоннажных арктических судов для обеспечения перевозок на трассах Северного морского пути.

## Библиографический список

### References

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II. Российский морской Регистр судоходства, 2018. [Rules for classification and construction of seagoing ships. Part II. Russian Maritime Register of Shipping, 2018. (in Russian)].
2. Анализ современных российских и зарубежных требований к ледовой прочности судов ледового плавания и ледоколов в части, касающейся анализа опыта эксплуатации современных судов ледового плавания и ледоколов // Научно-технический отчет ЦНИИМФ. Инв. № НТБ: 8571. 2016. [Analysis of current Russian and foreign requirements on the structural strength of ice-class vessels and icebreakers specifically regarding the operational experience of ice-class vessels and icebreakers. TSNIIMF Report. Ref. No. NTB8571. (in Russian)].
3. *Timco G.W., Frederking R.M.W.* Drop impact tests on freshwater ice: spherical head // Proceeding of the 10\* IAHR Ice Symposium. Espoo, Finland, Aug. 20–23, 1990. Vol. 11. P. 776–787.
4. *Timco G.W., Frederking R.M.W.* Laboratory impact tests on freshwater ice // Cold Region Science and Technology. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. 1993. Vol. 22. P. 77–97.
5. *Frederking R.M.W., Jordaen I.J., McCallum J.S.* Field Tests of Ice Indentation of Medium Scale Hobson's Choice Ice Island, 1989 // Proceeding of the 10\* IAHR Ice Symposium. Espoo, Finland, Aug. 20–23, 1990. Vol. II. P. 931–944.
6. *Апполонов Е.М.* Ледовая прочность судов, предназначенных для круглогодичной арктической навигации. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2016. [*Appolonov E.M.* Ice strength of ships designed for year-round arctic navigation. SPb.: Izd.SMTU, 2016. (in Russian)].
7. *Appolonov E.M., Nesterov A.B.* Perspectives of improving approaches to definition of ice loads acting on polar ship structures // Materials of IACS Ad-hoc Group on Polar Class Ships. Trondheim, 17–18 August 1997. P. 45.
8. *Апполонов Е.М., Дидковский А.В., Кутейников М.А., Нестеров А.Б.* Совершенствование методологии определения ледовых нагрузок // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2002. № 25. С. 83–100. [*Appolonov E.M., Didkovsky A.V., Kuteinikov M.A., Nesterov A.B.* Improvement of methodology for definition of ice loads. Collection of sci-tech papers of Russian Maritime Register of Shipping. 2002. No. 25. P. 83–100. (in Russian)].
9. *Гаина А.А.* Подходы к разработке новой модели взаимодействия корпуса судна со льдом // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 65(349). С.85–94. [*Gaina A.A.* Approaches to development of a new hull/ice interaction model. Transactions of Krylov Shipbuilding Research Institute. 2011. Issue 65(349). P. 85–94. (in Russian)].
10. *Головкин А.А., Нестеров А.Б.* Расчетное исследование влияния параметров новой модели взаимодействия корпуса судна со льдом на ледовые нагрузки // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 65 (349). С. 95–102. [*Golovkin A.A., Nesterov A.B.* Computational studies on how parameters of a new hull/ice interaction model influence the estimated ice loads Transactions of Krylov Shipbuilding Research Institute. 2011. Issue 65(349). P. 95–102. (in Russian)].
11. Разработка новой редакции главы Правил Регистра «Ледовые усиления судов ледового плавания и ледоколов» // Научно-технический отчет КГНЦ. 2017. Вып. 48799. [A new revision of the RMRS Rules's Chapter "Ice strengthening of ice-going ships and icebreakers". R&D Report of KSRC. 2017. Issue 48779. (in Russian)].
12. *Курдюмов В.А., Хейсин Д.А., Тряскин В.Н.* Определение ледовой нагрузки и оценка ледовой прочности корпусов транспортных судов // Труды ЛКИ. Ледопроездимость и ледовая прочность морских судов. 1979. С. 3–12. [*Kurdyumov V.A., Kheisin D.A., Tryaskin V.N.* Determination of ice loads and estimation of ice strength for cargo vessels. Transactions of LKI. Ice-going capabilities and ice strength of sea ships. 1978. P. 3–12. (in Russian)].
13. Det Norske Veritas. Rules for Classification of Ships. Newbuilding. Part 5. Chapter 1: Ships for Navigation in Ice. 2003.
14. Requirements Concerning Polar Class. IACS UR II & I2, 2011.

15. *Timco G.W., Weeks W.F.* A Review of the Engineering Properties of Sea Ice // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2010. Vol. 60. № 2. P. 107–129.
16. Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures. ISO 19906: 2011.
17. Разработка уточненной методологии определения прочностных характеристик ледовых образований, определяющих ледовое силовое воздействие на корпус судна и плавучие сооружения // Научно-технический отчет ЦНИИМФ по договору № РС-4/2015. 2015. [Refinement of methodology for determination of ice-feature strength characteristics governing ice loads on hulls of vessels and marine structures. R&D report of TSNIIMF under contract No. PC-4/2015. 2015. (in Russian)].
18. Разработка новых требований к надбавке на коррозию/эрозию с учетом применения электрохимической защиты и защиты на основе ледостойких лакокрасочных покрытий // Научно-технический отчет ЦНИИМФ. Инв. № НТБ: 8572. 2017. [Development of updated requirements regarding corrosion/erosion allowances taking into account electrochemical protection and ice-resistant paints. R&D report of TSNIIMF. Ref. No. NTB 8572. 2017. (in Russian)].

---

### Сведения об авторах

*Апполонов Евгений Михайлович*, д.т.н., генеральный директор АО «ЦКБ «Лазурит». Адрес: 603951, Россия, Ниж-

ний Новгород, ул. Свободы, 57. Тел.: +7 (831) 273-84-00. E-mail: em\_appolonov@cdb-lazurit.ru.

*Платонов Виктор Викторович*, к.ф.-м.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-45-73. E-mail: vv\_platonov@ksrc.ru.

*Тряскин Владимир Николаевич*, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой конструкции и технической эксплуатации судов Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. Адрес: 190008, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3. Тел.: +7 (812) 714-09-54. E-mail: tryaskin.vn@yandex.ru.

### About the authors

*Evgeny M. Appolonov*, D.Sc., General Director Lazurit Central Design Bureau. Address: ul. Svobody 57, Nizhny Novgorod, 603951, Russia. Tel.: +7 (831) 273-84-00. E-mail: em\_appolonov@cdb-lazurit.ru.

*Victor V. Platonov*, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), 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*, D. Sc., 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: 29.03.18  
Принята в печать / Accepted: 22.08.18  
© Коллектив авторов, 2018