

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

Научная статья

УДК 629.5.011

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-3/11-20>

Регламентация толщин ледового пояса судов

Виктор Анатольевич Кулеш, Эдуард Александрович Кузнецов✉,

Вячеслав Валерьевич Зимакин, Александр Витальевич Котлярский

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

✉ eduard-kuz.555@mail.ru

Аннотация. Безопасная работа судов во льдах в значительной мере связана с толщинами обшивки ледового пояса. Но увеличение этих толщин ведет к существенному росту массы корпуса и стоимости судов. Доля обшивки в массе усиленной конструкции может достигать до 70%. Поэтому регламентация толщин обшивки с учетом специфики её усиления имеет ключевое значение. Отечественная и мировая практики ледовых подкреплений судов имеют особенности. Одной из них является то, что кроме основных шпангоутов для подкрепления обшивки могут применяться промежуточные шпангоуты другого профиля и меньших размеров. Условия работы обшивки при этом существенно меняются, что должно учитываться при регламентации толщин. Однако обзор и анализ Правил разных классификационных обществ не выявляет такого учета. В итоге широкий спектр конструктивных проектных решений может приводить к неверным выводам и опасным последствиям в эксплуатации, в частности при переклассификации судов иностранной постройки в российские условия. В работе на основе анализа моделей разного уровня показаны особенности напряженно-деформированного состояния обшивки под ледовой нагрузкой и сделаны предложения по регламентации её толщин.

Ключевые слова: ледовый пояс судов, регламентация толщин, усиления и Правила, шпангоуты разного профиля

Для цитирования: Кулеш В.А., Кузнецов Э.А., Зимакин В.В., Котлярский А.В. Регламентация толщин ледового пояса судов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета 2024. № 3(60). С. 11–20.

DESIGN AND CONSTRUCTIONS OF SHIPS

Original article

Regulation of ship ice belt thicknesses

Victor A. Kulesh, Eduard A. Kuznetsov✉, Vyacheslav V. Zimakin, Alexander V. Kotlyarsky

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

✉ eduard-kuz.555@mail.ru

Abstract. The safe navigation of ships in the ice is strongly related to the thickness of the ice strake. But an increase in these thicknesses leads to a significant increase in the weight and cost of ships. The proportion of the plating in the weight of the reinforced structure can reach up to 70%. Therefore, the regulation of the thickness of the shell plating, taking into account the specifics of its reinforcements, is crucial importance. Russian and international experiences of ice reinforcement of vessels have their own peculiarities. One of them is intermediate frames of a different profile and smaller sizes in comparison with main frames can be used to strengthen the plating. At the same time, the working conditions of the plating change significantly, which should be taken into account when regulating thicknesses. However, a review and analysis of the Rules of different classification societies does not reveal such accounting. As a result, a wide range of constructive design solutions can lead to incorrect conclusions and dangerous consequences in operation, in particular when reclassifying foreign-built vessels to Russian conditions. Based on the analysis of models of different levels,

the paper shows the features of the stress-strain state of the plating under forces from interaction with ice and makes suggestions for regulating its thicknesses.

Keywords: ship’s ice strake, regulations of thicknesses, reinforcements and Rules, frames of a different profil
For citation: Kulesh V.A., Kuznecov E.A., Zimakin V.V., Kotlyarskij A.V. Regulation of ship ice belt thicknesses. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 3(60), pp. 11–20. (In Russ.).

Опыт проектирования

Отечественный и мировой опыт проектирования ледовых усилений судов характеризуется длительной историей и многообразием. Как правило, для повышения прочности обшивки ледового пояса и снижения её массы (толщин) наряду с балками основного набора применяют дополнительный промежуточный набор, который в международной практике часто именуют как «Ice Frame» – ледовый набор. Этот набор может быть существенно меньше основного, что предположительно связано с технологией сборки каркаса из балок набора, отличающейся простотой стыковки торцов меньших профилей к стенкам больших профилей. Примеры таких решений (рис. 1) чаще относятся к поперечной системе набора, но иногда встречаются и в случае продольной системы.

Здесь показаны реальное конструктивное решение с поперечной системой набора для рыболовного судна водоизмещением 1843 т, построенного в Германии (рис. 1а), и конструктивное решение с продольной системой набора для танкера водоизмещением 14333 т, построенного в Румынии (рис. 1б). Следует отметить, что из-за специфики эпюр ледовых нагрузок (локальные по высоте и вытянутые по длине судна) продольная система набора не является эффективной для усилений и далее не рассматривается.

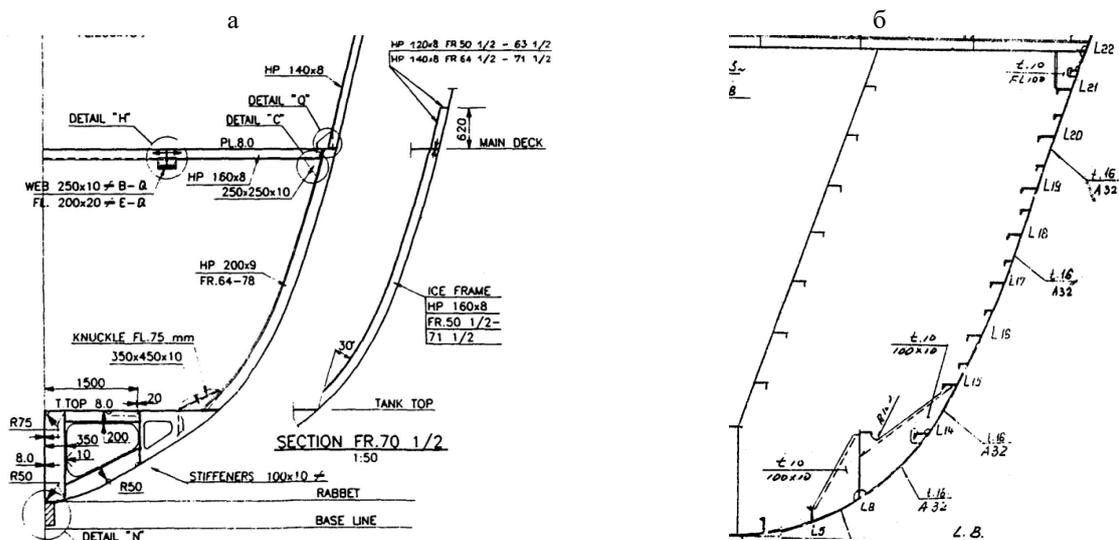


Рис. 1. Конструктивные решения по ледовым усилениям обшивки балками разного профиля: а) поперечная система набора; б) продольная система

Fig. 1. Structural solutions for ice reinforcement of the shell plating with girders of different profile: а) transverse scantling; б) longitudinal scantling

Практика показывает, что многообразие конструктивных решений имеет широкий спектр и даже на одном судне может быть несколько вариантов сочетания разных профилей балок. В таблице даны названия, назначение, водоизмещение, страна и год постройки судов. Все указанные суда иностранной постройки были приняты в класс Российского морского регистра судоходства (РМРС) и эксплуатировались с разными классами в соответствующих ледовых условиях. Предельные моменты сопротивления сечений балок, регламентируемые Правилами классификации РМРС 2024 [1] определены по формуле длякатаных профилей:

$$W = f_p \cdot (Y_0 + 0,5 \cdot s), \tag{1}$$

где f_p – площадь сечения профиля балки;
 Y_0 – высота положения центра тяжести сечения балки от обшивки;
 s – толщина обшивки.

В таблице также приведены цифры соотношения моментов сопротивлений промежуточных и основных шпангоутов. Здесь видно, что число комбинаций на одном судне может достигать до 3 и более. В примечаниях таблицы указаны типы и размеры профилей балок для случая наименьшего из соотношений (в 1-м столбце).

Соотношения моментов сопротивлений промежуточных и основных шпангоутов
 The ratio of the moments of resistance of intermediate and main frames

«Калам», рыболовное, 1843 т, Германия, 1994				Примечание
0,43	0,54	0,76	0,84	
«Виктория 1», рыболовное, 2808 т, Норвегия, 1992				HP160×8 + тавр 9×250/10×100
0,30	0,41	0,54	-	
«Персей», контейнеровоз, 14045 т, Германия, 1983				HP220×10 + HP240×11
0,76	0,91	-	-	
«Мыс Наварин», рыболовное, 3680 т, Япония, 1972				125×75×10 + тавр 9×200/14×90
0,40	0,54	0,76	-	
«Один», рефрижератор, 9793 т, Япония, 1984				JP180×9,5 + тавр 12×250/16×90
0,33	-	-	-	
«Viktoriya», плавбаза, 13093 т, Япония, 1986				150×10 + тавр 11×280/16×125
0,11	0,16	0,28	-	

Сокращения: HP – голландский несимметричный полособульб; JP – японский несимметричный полособульб.

Перечень судов и конструктивных решений можно продолжать, но уже представленные примеры показывают, что разнопрофильный набор широко применяют на судах разных назначений и размеров как для Атлантического, так и Тихоокеанского бассейна. При этом минимальные соотношения в европейских проектах имеют значения от 0,30 и выше, а в азиатских проектах опускаются до 0,11–0,16.

В таблице не представлены многие отечественные проекты. К сожалению, свобода проектных решений с разными профилями балок ледового пояса была ограничена несколько десятилетий назад и действует по настоящее время. При этом в Правилах Регистра СССР 1970 и 1977 свобода сохранялась для судов низких ледовых классов с ограничением соотношений моментов сопротивлений величиной не менее 0,75. Но примеров более низких соотношений достаточно. Например, большие морозильные рыболовные траулеры (БМРТ) проекта 394 имели соотношение 0,73, а рыболовные сейнеры (РС) проекта 388м – даже 0,55. Последние были построены большой серией в несколько сотен судов по Правилам Регистра СССР 1970. Их предшественники (по проекту 388) соответствовали Правилам 1956 и не имели вне форпика промежуточных шпангоутов (т.е. соотношение моментов сопротивления равно 0), при более толстой обшивке – 11 мм вместо 8 мм в носовом районе ледовых усилений после модификации. Важно отметить, что они оказались долговечнее (по срокам службы до списаний) в сравнении с судами более поздней модификации [1].

Анализ балки-полоски

Для пластин обшивки наиболее простой является модель балки-полоски. Изгибающие моменты вдоль пролета от распределенной нагрузки Q и сосредоточенной силы P от промежуточной балки в середине пролета обшивки между основными балками по справочнику [2] можно записать (в безразмерном виде):

$$\bar{M}(\bar{x}) = \frac{12 \cdot M(x)}{Q \cdot l} = 1 - 6 \cdot \bar{x} + 6 \cdot \bar{x}^2 - 1,5 \cdot \bar{P} (1 - 4 \cdot \bar{x}) \tag{2}$$

Судно после 14 лет эксплуатации в японских условиях было взято в класс РМРС для работы в экспедициях Охотского и Берингова морей. При переклассификации судну был присвоен довольно высокий класс L2, соответствующий Ice3. Эта явная переоценка ледовых качеств судна была связана с тем, что при шпации 750 мм «расстояние между балками основного набора» формально составляло 375 мм. Факт того, что прочность промежуточных шпангоутов судна на порядок меньше, чем у основных шпангоутов (см. таблицу), не был принят Регистром во внимание.

Судно проработало в сложных российских условиях 17 лет и получало ледовые повреждения с заменами обшивки и ремонтом набора (рис. 4).



Рис. 4. Состояние и деформации ледового пояса плавучей базы «Viktoriya» (2008)

Fig. 4. Condition and deformations of ice strike of floating fish factory «Viktoriya» (2008)

В 2007 г. судно было передано во фрахт китайской компании и приступило к работе в более легких условиях промысловых экспедиций у берегов Чили. Китайский оператор пожелал оставить судно в классе РМРС. При этом ледовый класс по согласованию с оператором и Регистром был снижен до L3 (соответствует Ice2).

Бортовое перекрытие в районе анализа ледовой прочности имеет высоту 5,6 м при длине 7,5 м (10 шпаций). Оно включает основные шпангоуты в виде тавра 11×280/16×125 мм; три интеркостельных стрингера с интервалом 1,4 м полосового профиля 10×150 мм и промежуточные шпангоуты такого же профиля. Параметры нормативной расчетной нагрузки по Правилам классификации 2024 для символа Ice2: 979,4 кПа – интенсивность давлений в центре зоны; 0,617 м – высота зоны; 4,91 м – длина зоны давлений.

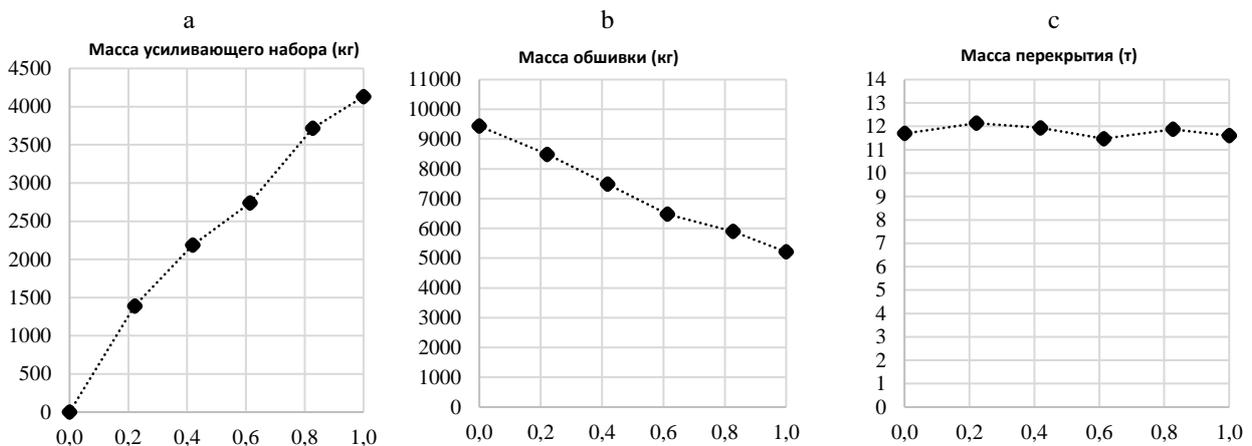


Рис. 5. Влияние промежуточного (усиливающего) набора на весовые параметры перекрытия (балочные модели и программа FESTA):

а) масса усиливающего набора; б) масса обшивки; в) масса всего перекрытия

Fig. 5. Influence of intermediate structural elements on weight characteristics of assembly (girder models and program FESTA): a) mass of stiffening framing; б) mass of shell; в) mass of assembly

Анализ балочной модели фрагмента перекрытия в программе FESTA включал два основных шпангоута, один промежуточный шпангоут с варьируемыми размерами и полосу наружной обшивки шириной 617+750 мм (высота зоны + шпация). Толщина наружной обшивки менялась так, чтобы во всех случаях наибольшие напряжения в ней были равны 150 МПа. Результаты расчетов весовых параметров перекрытия представлены на рис. 5. Роль интеркостельных стрингеров в этих расчетах не учитывалась в безопасную сторону.

Расчеты при неизменной массе основного набора, нарастающей массе промежуточного (усиливающего) набора (рис. 5а) и при условии равной прочности обшивки показали, что её масса и соответственно толщина снижаются практически линейно (рис. 5б). При этом общая масса перекрытия остается в основном на одном уровне (рис. 5в). Таким образом, результаты, приведенные на рис. 2б, подтвердились, а степень усиления не выявила эффекта по массе перекрытия в целом.

Анализ пластинчатых моделей

Классические балочные модели «Строительной механики корабля» (СМК) для перекрытий и других судовых конструкций прошли многолетнюю апробацию на практике. В них обшивка ограничивается ролью «присоединенных поясков», участвующих в работе балок набора. При этом условия работы обшивки явно упрощаются, так как присоединенные пояски не взаимодействуют друг с другом. В результате нет возможности получить полную картину напряженно-деформированного состояния (НДС) обшивки.

Формально практика применения разнопрофильных шпангоутов при подкреплении наружной обшивки должна сопровождаться соответствующим регламентом её толщины с учетом разной профильности набора. Однако ни в отечественных Правилах, ни в зарубежных [3-5] такой регламентации не выявлено.

Для анализа НДС использована программа SolidWorks. Один из вариантов рассчитанных перекрытий приведен на рис. 6а. Эпюра расчетной ледовой нагрузки представлялась в виде треугольной призмы на прямоугольной зоне давлений. Центр приложения нагрузки располагался в середине перекрытия по длине и смещен от уровня палубы на 2,1 м (в середину интервала между стрингерами).

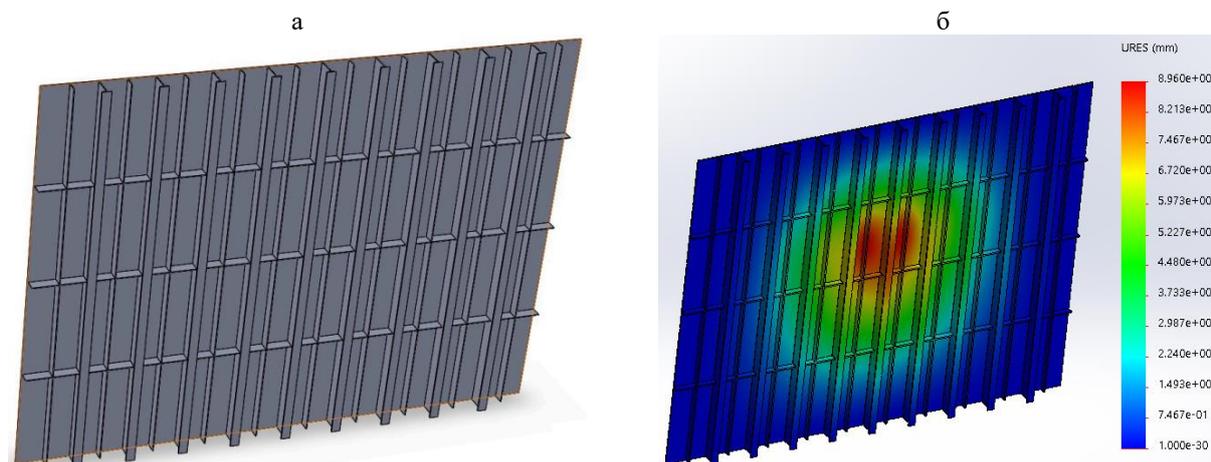


Рис. 6. Перекрытие с разнопрофильным набором (а) и эпюра прогибов под действием пиковой ледовой нагрузки (б)

Fig. 6. Assembly with frames of a different profile (a) and diagram of deflections under influence of peak ice stress (б)

Расчеты выполнены в два этапа. На первом этапе группой магистрантов были рассчитаны варианты перекрытий с разными конструктивными решениями по усиливающему набору. Размеры усиливающего набора менялись дискретно: толщина полосового профиля в ос-

новном с интервалом 5 мм, а высота – с интервалом 50 мм. Граничные условия и условия задания сетки конечных элементов оставались неизменными. При этом число конечных элементов находилось в диапазоне от 51 400 до 66 800. Задача расчетов заключалась в поиске такой толщины обшивки (с точностью до 0,1 мм), при которой уровень наибольших приведенных напряжений (по Мизесу) в ней достигает 150 МПа. Правила не регламентируют допускаемые напряжения для ледовой прочности. Поэтому здесь принят уровень, близкий к 0,65 от напряжений текучести материала, допускаемый по п. 2.5.4.1 Правил для шпангоутов наружного борта при давлении моря.

На втором этапе аспирантом Э.А. Кузнецовым были выполнены контрольные расчеты для трех наиболее важных вариантов (рис. 7, красные маркеры):

- при отсутствии промежуточных шпангоутов (координата 0 по горизонтальной оси);
- при усиливающем наборе по проекту японского судна (координата 0,11);
- при усиливающем наборе с моментом сопротивления как у основного (координата 1,0).

Результаты влияния конструктивных решений на параметры перекрытий показали, что при неизменной массе основного набора и монотонном нарастании массы усиливающего набора (рис. 7а), масса равнопрочной наружной обшивки уменьшается нелинейно (рис. 7б). В результате общая масса перекрытия (рис. 7в) в диапазоне от 0 до 0,3 быстро снижается, а в диапазоне от 0,5 до 1,0 снова нарастает. Наличие минимума массы в диапазоне 0,3–0,5 позволяет полагать, что существует «оптимальное» конструктивное решение как минимум по критерию массы. Поиск таких решений является самостоятельной задачей и выходит за рамки данной работы.

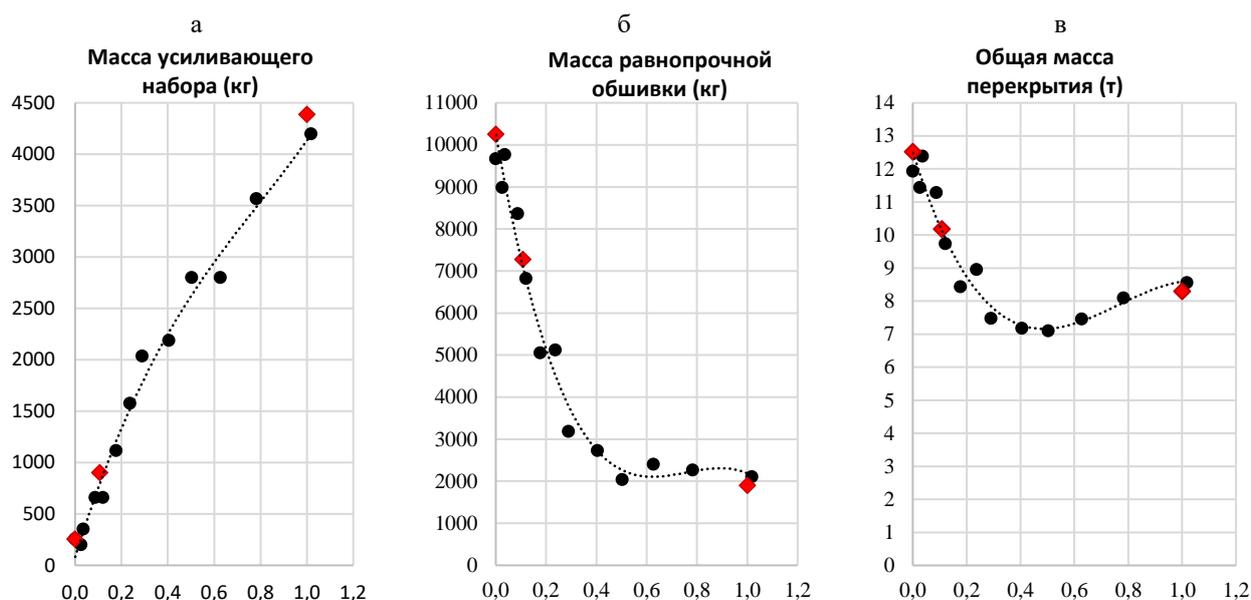


Рис. 7. Влияние промежуточного усиливающего набора на весовые параметры перекрытия (пластинчатые модели и программа SolidWorks):

а) масса усиливающего набора; б) масса равнопрочной обшивки; в) масса всего перекрытия

Fig. 7. Influence of intermediate structural elements on weight characteristics of assembly (plate models and program SolidWorks): а) mass of stiffening framing; б) mass of shell; в) mass of assembly

Появление минимума может быть объяснено одной из гипотез. Первая состоит в том, что при пластинчатой идеализации конструкций эффект разнесения нагрузки обусловлен не только стрингерами, но и незагруженными участками обшивки. Вторая следует из рис. 7б, на котором в диапазоне соотношений 0,5–1,0 масса обшивки практически не меняется. Это может быть следствием того, что при достаточно прочном промежуточном наборе наибольшие напряжения пластины практически не меняются, при этом обшивка в промежутках между бал-

ками набора готовится к повреждению в виде гофрировки. Расчеты также показали, что уровень напряжений в промежуточном наборе может достигать до 200 МПа, а в основном наборе – до 250 МПа.

Особое значение имеет вывод о том, что оптимизация конструктивных решений по усилению наружной обшивки ледового пояса судов важна, и не только по массе. Формально она не может быть выполнена в рамках традиционных балочных моделей и здесь необходимо использовать пластинчатые модели.

Регламентация толщин обшивки

Предложения по регламентации толщин обшивки ледового пояса являются главной задачей данной работы. Для её решения, кроме учета результатов представленных исследований, полагается важным сохранить содержание и суть сложившейся практики отечественной регламентации, записанной в действующих Правилах. Формула для требуемой толщины остается без изменений, но дополняется коэффициентом k_w :

$$s = 15,8k_w \frac{a}{1+0,5a/b} \sqrt{\frac{p}{ReH}} + \Delta s \geq s_{min}, \quad (3)$$

где $k_w = \max \left(\frac{1-2 \cdot W_i/W_o}{0,5-0,25 \cdot W_i/W_o} \right); \quad (4)$

a – расстояние между основными шпангоутами, измеряемое вдоль обшивки;
 W_i – предельный момент сопротивления промежуточных (ледовых) шпангоутов;
 W_o – предельный момент сопротивления основных шпангоутов в данном районе;
 прочие параметры остаются как в действующих Правилах РМРС.

Проверочные расчеты для рассмотренного судна с использованием формул (3)-(4) и дополнительных данных: угол наклона ватерлинии 12 град. и надбавка на износ 4,5 мм показали, что при отсутствии промежуточных шпангоутов требуемая толщина составит 19,8 мм, что практически равно построечной толщине – 20 мм. При учете проектных размеров промежуточных шпангоутов требуемая толщина обшивки составит 16,4 мм, что на 18% меньше построечной. Таким образом, обшивка данного судна в своем наиболее слабом районе удовлетворяет ледовому классу Ice2 РМРС с запасом, практически эквивалентным допускаемому Регистром в эксплуатации износу в 20%. Приведенные результаты показывают их адекватность согласованным письмом № 010-7.2.2-1868 от 27.01.2009 Главного управления РМРС нормативам допускаемого износа, действующим для этого судна.

Заключение

Анализ практики проектирования и регламентации толщин ледового пояса показал, что она охватывает широкий спектр возможных конструктивных решений с применением основного и усиливающего (промежуточного) набора разного профиля. К сожалению, спектр таких решений постепенно ограничивался РМРС и в действующих Правилах осталось жесткое требование равенства профилей основных и промежуточных шпангоутов. Такое требование резко ограничивает возможности для оптимизации проектных решений и снижает конкурентоспособность отечественных проектов на мировом рынке. Кроме того, оно формально становится препятствием на пути переклассификации судов иностранной постройки с получением достойного уровня ледового класса, если на судне шпангоуты разного профиля. Проведенные исследования показали, что разнопрофильные шпангоуты могут быть полезны для практики и приводить к снижению массы перекрытий. Данный эффект не выявлен в рамках балочных моделей и требует использования пластинчатых моделей. В работе предложен подход к регламентации обшивки ледового пояса, сохраняющий в основе существующий подход, но с учетом поправочного коэффициента в функции от соотношения моментов сопротивления промежуточных и основных шпангоутов. Данная работа продолжает исследования [6–8] по развитию отечественной регламентации усилений корпусов судов и одновременно расширяет круг

вопросов [9] в отношении «не эталонных» конструктивных решений для совершенствования и конкурентных возможностей отечественного флота.

Благодарности

Авторы выражают благодарность студентам группы М-3123 департамента Морской техники и транспорта Политехнического института ДВФУ, принимавшим участие в моделировании и расчетах вариантов бортовых перекрытий, а также рецензенту за ценные замечания и рекомендации по развитию этой темы.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Claimed contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кулеш В.А., Огай С.А., Войлошников М.В. Классификация и мониторинг надежности ледового пояса морских объектов // Морские интеллектуальные технологии. 2015. Т.1, № 3(29). С. 55–61.
2. Давыдов В.В., Маттес Н.В. и др. Прочность судов внутреннего плавания. Справочник. Москва, Транспорт, 1978. 520 с.
3. Rules and Regulations for the Classification of Ships. Lloyd's Register. London: Lloyd's Register, 2022. 1811 p.
4. Rules for construction of ocean-going steel fishing vessels. China Classification Society. Beijing: China Classification Society, 2022. 483 p.
5. Rules for the Classification of Ships. Part 5 – Ship types. Chapter 12 – Fishing vessels. Berum: Det Norske Veritas, 2022. 42 p.
6. Kuznetsov E.A., Kulesh V.A., Isaev G.A., Kotov A.O. Comparative analysis of design requirements for fishing vessels and offers for their development // The 35th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures TEAM 2022. P. 66–71.
7. Курдюмов В.А., Рябов Л.И., Тряскин В.Н. Анализ работы бортовых перекрытий транспортных судов под действием ледовой нагрузки // Труды ЛКИ. Ледопроеходимость и ледовая прочность. Ленинград, 1979.
8. Апполонов Е.М. Ледовая прочность судов, предназначенных для круглогодичной арктической навигации. Санкт-Петербург: СПбГМТУ, 2016. 287 с.
9. Кузнецов Э.А., Кулеш В.А., Суворов О.Э., Фам Ч.Х. Проблемы ледовой регламентации «неэталонных» конструкций // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3. С. 23–29.

REFERENCES

1. Kulesh V.A., Ogaj S.A., Vojloshnikov M.V. Classification and monitoring of reliability of ice strike of maritime objects. *Morskie intellektual'nye tehnologii*, 2015, vol. 1, no. 3(29), pp. 55–61. (In Russ.).
2. Davydov V.V., Mattes N.V. and others. Strength of inland-water ships. Book of reference. Moscow, Transport Publ., 1978. 520 p. (In Russ.).
3. Rules and Regulations for the Classification of Ships. Lloyd's Register. London, Lloyd's Register, 2022. 1811 p.
4. Rules for construction of ocean-going steel fishing vessels. China Classification Society. Beijing, China Classification Society, 2022. 483 p.
5. Rules for the Classification of Ships. Part 5. Ship types. Chapter 12. Fishing vessels. Berum, Det Norske Veritas, 2022. 42 p.
6. Kuznetsov E.A., Kulesh V.A., Isaev G.A., Kotov A.O. Comparative analysis of design requirements for fishing vessels and offers for their development. *The 35th Asian-Pacific Technical Exchange and*

- Advisory Meeting on Marine Structures TEAM 2022*, pp. 66–71.
7. Kurdyumov V.A., Ryabov L.I., Trypsin V.N. Analysis of the condition of the side assembly of transport vessels under the influence of ice load. *Writings of LKI. Ice trafficability and ice strength*. Leningrad, 1979. (In Russ.).
 8. Appolonov E.M. Ice strength of vessels designed for year-round Arctic navigation. Saint Petersburg, 2016. 287 p. (In Russ.).
 9. Kuznecov E.A., Kulesh V.A., Surov O.E., Fam Ch.H. Problems of ice regulation of "non-standart" structures. *Morskije intellektual'nye tehnologii*, 2023, no. 3, part 3, pp. 23–29. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кулеш Виктор Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация)

✉ vkulesh@mail.ru

Victor A. Kulesh, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

Кузнецов Эдуард Александрович – аспирант, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация)

✉ eduard-kuz.555@mail.ru

Eduard A. Kuznetsov, Postgraduate Student, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

Зимакин Вячеслав Валерьевич – магистрант, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация)

✉ zimakin@list.ru

Vyacheslav V. Zimakin, Master's Degree Student, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

Котлярский Александр Витальевич – магистрант, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация)

✉ kotliarskii.av@dvfu.ru

Alexander V. Kotlyarsky, Master's Degree Student, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию / Received: 08.07.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 27.07.2024.

Принята к публикации / Accepted: 20.09.2024.