

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-44-48  
УДК 629.5.023.242а

А.А. Петров, М.С. Шилкина  
АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, Россия

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ ЛЕДОВЫХ УСИЛЕНИЙ НЕФТЕНАЛИВНОГО СУДНА ПРИ СМЕНЕ ЛЕДОВОГО КЛАССА

Обозначена проблема выбора того или иного ледового класса при переходе судна в класс Российского морского регистра судоходства. Подготовлена расчетная база для создания универсального инструмента сравнительной оценки металлоемкости конструкций ледового пояса судов ледового плавания, который может быть реализован путем определения, в рамках двух классификаций судов ледового плавания и ледоколов, всех параметров судна, прямо или косвенно влияющих на массу требуемого металла ледовых усилений. В качестве примера выполнен расчет требуемых размеров конструкции ледовых усилений при реклассификации нефтеналивного судна. На основании полученных расчетов было выполнено заключение о металлоемкости и предложен возможный вариант рационализации конструкции. Дополнительно приведен экономический анализ затрат на модернизацию корпуса судна при двух случаях компоновки конструкции. Сделаны выводы о необходимости автоматизации расчетов, для выполнения оперативной оценки металлоемкости и стоимости ремонтных работ.

**Ключевые слова:** ледовый класс, металлоемкость, автоматизация расчетов, реклассификация.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-44-48  
UDC 629.5.023.242a

A.A. Petrov, M.S. Shilkina  
JSC CNIIMF, St. Petersburg, Russia

## PECULIARITIES OF METAL CONSUMPTION CALCULATIONS FOR ICE BELT OF TANKER TO CHANGE ITS ICE CLASS

This paper discusses the assignment of this or that ice class as per RS system. The calculations have been prepared to develop a universal tool for comparative metal consumption assessment of ice belts aboard ice-going ships, which might be implemented by determination in terms of the two classifications of ice-going ships and icebreakers of all ship parameters that influence, directly or indirectly, on required metal weight of ice belt structures. This approach is illustrated by a case study: calculation of required ice belt size for a tanker to change her ice class. These results made it possible to judge about metal consumption of ice belt structure and suggest a possible way for its optimization. Additionally, cost effectiveness of hull upgrade was compared for the two variants of ice belt design. The conclusions of this paper underline the necessity of automated calculations for fast assessment of metal consumption and repair costs.

**Keywords:** ice class, metal consumption, automated calculations, ice class change.

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

### Введение

Важнейшим вопросом, возникающим перед судовладельцем при заказе нового или приобретении

подержанного судна, является определение его эксплуатационных возможностей и/или ограничений. В случае с новым судном данный вопрос решается

---

*Для цитирования:* Петров А.А., Шилкина М.С. Особенности расчетов металлоемкости ледовых усилений нефтеналивного судна при смене ледового класса. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; Специальный выпуск 1: 44–48.

*For citations:* Petrov A.A., Shilkina M.S. Peculiarities of metal consumption calculations for ice belt of tanker to change its ice class. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; Special Edition 1: 44–48 (in Russian).

еще на ранних этапах проектирования и, поэтому, не стоит так остро, как в случае поиска подходящего судна на вторичном рынке. Данная процедура дополнительно усложняется выбором и получением оптимального ледового класса с учетом предполагаемого района эксплуатации, что особенно актуально в последнее время в связи неуклонным ростом интенсивности судоходства в Арктике.

Как правило, российские судовладельцы, планирующие или уже работающие в этом регионе, в силу ряда причин, предпочитают иметь класс Российского морского регистра судоходства (PMPC), при этом ледовый класс, позволяющий круглогодичную эксплуатацию в арктических морях, должен быть не ниже Arc4. К судам ледовых классов предъявляются особые требования, изложенные, в первую очередь, в соответствующих частях Правил классификации и постройки морских судов PMPC [1], выполнение которых зачастую требует от судовладельца выполнения определенных организационно-технических мероприятий или ремонтных работ. Исходя из опыта АО «ЦНИИМФ», ежегодно выполняющего 2–3 обоснования соответствия суда ледовому классу, в подавляющем большинстве случаев наибольшие финансовые затраты при модернизации судна приходятся на корпусные и сопутствующие работы<sup>1</sup>. При этом ключевым параметром, от которого зависит принятие решения о дальнейшей работе по присвоению ледового класса, является цена такой модернизации, поэтому ее определение на начальном этапе работы с судном – весьма актуальная задача, востребованность которой растет соразмерно скорости ее решения. Таким образом, основная цель настоящей работы – подготовка расчетной базы для создания универсального инструмента сравнительной оценки металлоемкости конструкций ледового пояса судов ледового плавания. Основными задачами, позволяющими достичь указанную цель являются оценка металлоемкости конструкций ледового пояса на примере одного судна и выявление параметров, влияющих на конечное значение металлоем-

кости (стоимости ремонта). Учитывая то, что большинство судов, приобретаемых российскими судовладельцами, переходят в класс PMPC из классов иностранных классификационных обществ-членов МАКО, классифицирующих суда ледового плавания по финско-шведским правилам (FSR – Finnish Swedish Rules), приблизительно эквивалентным классу Arc4 PMPC является ледовый класс IA FSR [2]. Эти два класса и будут рассмотрены в данной работе.

## Виды классификации судов ледового плавания

Как было сказано выше, в работе будет выполнена оценка металлоемкости судна при смене ледового класса IA FSR на класс Arc4 PMPC. Таким образом, при решении этой задачи будет достигнута основная цель работы – подготовка расчетной базы для создания универсального инструмента оценки металлоемкости. На данном этапе рассматриваются два вида классификации судов ледового плавания:

- классификация Российского морского регистра судоходства (PMPC);
- классификация балтийских судов по Финско-Шведским правилам (FSR).

Помимо вышеуказанных, существует еще одна система классификации судов ледового плавания – IACS UR I (Polar Class) [3], однако ее рассмотрение в рамках данной работы не требуется, поскольку оно выполнялось ранее при создании программного обеспечения (ПО) MARSOLS [4, 5].

В основе определения расчетных ледовых нагрузок по правилам PMPC лежит гидродинамическая модель Курдюмова-Хейсина, которая рассматривает два вида ледовых нагрузок:

- от прямого удара о ледовое поле, действующего на оконечности судна;
- от сжатия судна во льдах, которое действует на цилиндрическую вставку.

Прямые ударные ледовые нагрузки в оконечностях судна определяются в предположении, что борт судна имеет угол наклона  $\beta$  к вертикали, а кромка льда представляет собой дугу окружности радиуса  $R$ , где возникает зона контакта, имеющая форму параболического сегмента с размерами (длины, ширины, площадь) зоны контакта.

Определение параметров ледовой нагрузки в зоне контакта связано с задачей установления момента глобального разрушения ледового поля как полубесконечной пластины, лежащей на упругом основании, под действием приложенного к его

<sup>1</sup> Редкие исключения составляют суда, не соответствующие требуемому ледовому классу по мощности главных механизмов или по характеристикам винторулевого комплекса (ВРК). В первом случае, как правило, дальнейшая работа по получению ледового класса нецелесообразна, во втором – возможна модернизация ВРК, в зависимости от характера несоответствия влекущая за собой дополнительные испытания движителя, объемные расчеты пропульсивного комплекса и мореходности и т.п.

кроме усилия  $P$ , находящееся как меньшее из двух величин:

- усилия вызывающего разрушение ледового поля от изгиба за счет вертикальной составляющей;
- усилия, приводящего к потере устойчивости ледового поля за счет горизонтальной составляющей.

Параметры ударной ледовой нагрузки в существенной степени зависят от характеристик прочности льда (пределов прочности льда на изгиб, сдвиг, местное смятие, параметра прочности льда на раздробление) и в меньшей степени от формы (радиуса скругления) ледовой кромки.

При определении ледовой нагрузки при сжатии во льдах, рассматривают два варианта:

- при наклонных бортах (разрушение ледового покрова от изгиба)
- при вертикальных бортах (разрушения ледового покрова от потери устойчивости и пластического смятия).

В отличие от расчета ледовых нагрузок по правилам РМРС предельные ледовые нагрузки, определяемые по правилам FSR, не учитывают влияние формы корпуса.

Методика определения расчетных ледовых нагрузок основывается на статистической зависимости между интенсивностью ледовой нагрузки, водоизмещением судна и мощностью главных механизмов.

$$p = C_d C_p C_a p_0. \quad (1)$$

Основные составляющие формулы (1) включают:  $p_0$  – номинальное давление льда для всех типов ледовых классов, равное 5,6 МПа, так как свойства балтийского моря существенно не изменяются в течение зимы по районам эксплуатации;  $C_d$  – коэффициент, учитывающий влияние главных размеров судна и мощности его энергетической установки на величину ледовой нагрузки;  $C_a$  – коэффициент, который учитывает вероятность того, что ледового давления возникает одновременно по всей длине соответствующего района корпуса судна;  $C_r$  – коэффициент, который учитывает вероятность того, что для данного ледового класса и данного района корпуса ледовое давление достигает своего расчетного значения.

Максимальные напряжения шпангоутов, максимальные напряжения смежных листов обшивки и приложенная ледовая нагрузка не согласуются друг с другом, если давление равномерно распределено. Поэтому для получения давления льда  $p$ , используют

ся три мультипликативных коэффициента, каждый из которых меньше единицы, описанных выше.

Параметры, влияющие на величину ледовой нагрузки и размеры конструкций ледовых усилений, приведены ниже в таблице.

## Расчет требуемых размеров конструкций ледового пояса

На первом этапе работы были определены требуемые размеры конструкций ледовых усилений по соответствующим частям Правил РМРС, для чего последовательно были идентифицированы районы ледовых усилений, определены расчетные параметры ледовых нагрузок и рассчитаны требуемые толщины листовых элементов и геометрические характеристики балок набора. В рамках данной работы выполнялся проверочный расчет ледовой прочности, поэтому сравнивались значения требуемых толщин листовых элементов и требуемых площадей поперечного сечения балок набора, без подбора ближайших стандартных толщин листов и профилей балок. Поскольку Правила РМРС и FSR по-разному нормируют районы ледовых усилений, часть конструкций не регламентирована последними (например, днищевая обшивка и балки набора в носовой оконечности). Ввиду этого, при прямом сравнении требуемых размеров ледовых усилений т.е. при исходной компоновке конструктивных элементов судна, имевшего с постройки класс IA FSR, разница в требуемой массе металла весьма существенна, поэтому был выполнен дополнительный расчет, учитывающий модернизацию судна при смене класса, выражавшуюся в установке промежуточных ребер жесткости в районе днищевой обшивки в носу (см. рис. 1). Результаты сравнения металлоемкости для трех расчетных случаев приведены на рис. 2. Дополнительно, для наглядности, приведены стоимостные показатели возможного ремонта, необходимого для получения ледового класса Arc4, из расчета 4,5 \$ за 1 кг металла, включая его стоимость и дополнительные работы по гибке и резке.

## Автоматизация расчетов

Увеличение скорости выполнения расчетов возможно, прежде всего, за счет их автоматизации. Учитывая специфику нормативных документов, регламентирующих требования к судовым конструкциям, а также то, что практически каждое судно уникально, и унификация переменных, входящих в зависимости, по которым определяются требуемые размеры связей, хорошо реализуема

Параметры, влияющие на металлоемкость, определенные для формул требуемых размеров ледовых усилений в носовом районе

	PMPC	FSR
Расчетная ледовая нагрузка	$p_{AI} = 2500 a_1 v_m^6 \sqrt{\frac{\Delta}{1000}}$	$p = C_d C_p C_a p_0$
Параметры:	$p_{AI} = f(\alpha, \beta, \Delta)$	$P = f(P, \Delta, l_{\text{попер}}, l_{\text{прод}})$
Толщина наружной обшивки	$S_{н0} = 15,8 a_0 \sqrt{\frac{P}{R_{eH}}}$	$t = \frac{2}{3} s \sqrt{f \left( \frac{h}{s} \right) \frac{P_{PL}}{\sigma_y}}$
Параметры:	$S_{н0} = f(a_{\text{попер}}, a_{\text{прод}}, \Delta, \alpha, \beta, R_{eH})$	$t = f(s, \sigma_y, \Delta, P, l_{\text{попер}}, l_{\text{прод}})$
Момент сопротивления шпангоута	$W_{ш0} = \frac{250}{R_{eH}} p b a l Y k_k E \omega_{ш}$	$Z = \frac{p s h l}{m_t \sigma_y} 10^6$
Параметры:	$W_{ш0} = f(a, l, \Delta, \alpha, \beta, R_{eH})$	$Z = f(s, \sigma_y, P, \Delta, l_{\text{попер}}, l_{\text{прод}})$
Площадь поперечного сечения шпангоута	$A_{ш0} = \frac{8,7 p a b}{R_{eH}} k_2 k_3 k_4$	$A = \frac{\sqrt{3} f_3 p s h}{2 \sigma} 10^4$
Параметры:	$A_{ш0} = f(a, l, \Delta, \alpha, \beta, R_{eH})$	$A = f(s, \sigma_y, \Delta, P, l_{\text{попер}}, l_{\text{прод}})$
Условные обозначения параметров	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>\alpha</math> – угол наклона летней ватерлинии, измеряемый согласно 3.10.1.2 Правил РМРС Части II;</li> <li>2. <math>\beta</math> – угол наклона летней ватерлинии, измеряемый согласно 3.10.1.2 Правил РМРС Части II;</li> <li>3. <math>a</math> – расстояние между обыкновенными шпангоутами, измеренное по борту, м;</li> <li>4. <math>l</math> – расчетная длина пролета шпангоута, м;</li> <li>5. <math>R_{eH}</math> – верхний предел текучести, МПа;</li> <li>6. <math>\Delta</math> – водоизмещение по летнюю грузовую ватерлинию, т.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>s</math> – расстояние между шпангоутами, м;</li> <li>2. <math>\sigma_y</math> – предел текучести материала, МПа;</li> <li>3. <math>P</math> – мощность главных механизмов, фактически передаваемая на движители при непрерывной работе, кВт;</li> <li>4. <math>\Delta</math> – массовое водоизмещение судна при максимальной осадке во льду, т;</li> <li>5. <math>l_{\text{попер}}</math> – величина пролета шпангоута, м;</li> <li>6. <math>l_{\text{прод}}</math> – величина пролета балки при продольной системе набора, м.</li> </ol>

только на низком уровне (создание баз данных по стандартным профилям балок, коэффициентов из таблиц Правил и т.д.), на сегодняшний день достаточно трудно адаптировать существующие программные средства под описанные выше задачи. Поэтому наиболее эффективным решением в данном случае является создание специализированного ПО. Как было сказано ранее, подобная задача, применительно к Полярным правилам, уже решена в ПО MARSOLS [4, 5], и следующим этапом работы по расширению его функционала будет являться добавление расчетов требуемых размеров ледового

пояса по Правилам РМРС и FSR с последующей оценкой объема необходимого дооборудования. Учитывая то, что структура ПО построена по принципу «модульности», в котором все «универсальные» переменные вынесены в статические базы данных по каждому судну и задаются единожды (размерения судна, фактические размеры конструкций и т.п.), а «уникальные» переменные, свойственные только одному или некоторым типам расчетов – в динамические, связывающие судно с конкретной задачей, разделом Правил и т.д., добавление новых типов расчетов не вызовет практических

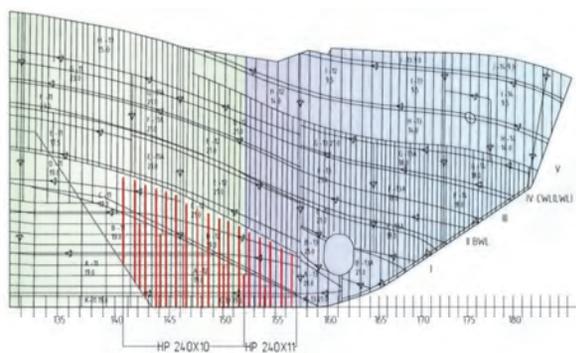


Рис. 1. Схема подкрепления днищевой обшивки

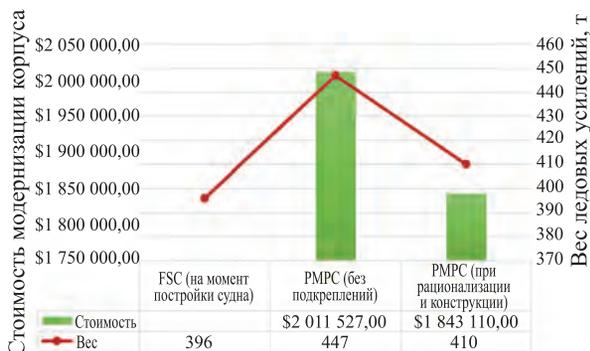


Рис. 2. Сравнительная оценка металлоемкости и стоимости ремонта

трудностей, однако при их формировании необходимо следовать общей логике построения ПО и его архитектуре, как это описано в [5].

## Заключение

Оценка объема дооборудования судна для соответствия требуемому ледовому классу – одна из востребованных практических задач, встающих перед судовладельцем при покупке и реклассификации подержанного судна, при этом скорость такой оценки является ее важнейшей характеристикой. Для решения этой задачи в рамках данной работы

за счет выполнения сравнительной оценки металлоемкости конструкций ледовых усилений нефтеналивного судна подготовлена расчетная база для расширения функционала специализированного ПО MARSOLS, которая позволит в кратчайшие сроки давать судовладельцу исчерпывающую информацию об экономических, с точки зрения объема ремонта, последствиях выбора того или иного ледового класса при реклассификации.

## Библиографический список

1. Правила классификации и постройки морских судов: в 17 ч. – СПб: Российский морской регистр судоходства, 2018.
2. Международная ассоциация классификационных обществ. Символика классификации судов. Справочник. – СПб: PMPC, 2015.
3. Requirements concerning. Polar Class. – IACS UR I.
4. Петров А. А., Лебехов И. А. Программный комплекс автоматизации расчетов по полярным правилам и выбора рациональных конструктивных решений // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; специальный выпуск 1: 137–141.
5. Петров А. А., Лебехов И. А., Идрисова С. Создание программного обеспечения для разработки эксплуатационной документации на суда ледового плавания // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; специальный выпуск 2: 25–32.

## Сведения об авторах

Петров Алексей Анатольевич, заведующий отделом конструктивной надежности и защиты судов от коррозии АО «ЦНИИМФ». Адрес: 191015, г. Санкт-Петербург, Кавалергардская улица, д.6, лит. А. Телефон: (812) 271-12-67. E-mail: Petrov25@cniimf.ru.

Шилкина Марина Сергеевна, инженер 1 категории АО «ЦНИИМФ». Адрес: 191015, г. Санкт-Петербург, Кавалергардская улица, д.6, лит. А. Телефон: (812) 271-12-67. E-mail: ShilkinaMS@cniimf.ru.

Поступила / Received: 22.03.19  
 Принята в печать / Accepted: 08.04.19  
 © Коллектив авторов, 2019