

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕДОВЫХ УСИЛЕНИЙ СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ И ЛЕДОКОЛОВ НА ОСНОВЕ ТРЕБОВАНИЙ ПРАВИЛ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ

Тряскин В. Н., Рюмин С. Н., Смирнов Ю. А., Неверовская Л. П., Мороз В. С.

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

Статья поступила в редакцию 11 января 2025 г.

Для цитирования

Тряскин В. Н., Рюмин С. Н., Смирнов Ю. А. и др. Проектирование конструкций ледовых усиления судов ледового плавания и ледоколов на основе требований Правил Российского морского регистра судоходства в специализированном программном обеспечении // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 2. — С. 300—313. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-300-313.

Представлена математическая постановка задачи проектирования ледовых усиления на основе требований Правил Российского морского регистра судоходства для бортовых конструкций при поперечной системе набора с рамными шпангоутами. Предложены алгоритмы ее решения при использовании профильного проката и сварного составного профиля для изготовления балок основного набора. Рассмотрена методика формирования исходных данных задачи средствами системы автоматизированного параметрического проектирования САПР-К, разрабатываемой на кафедре конструкции и технической эксплуатации судов Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. Обоснованы возможность, целесообразность и эффективность применения алгоритма прямого перебора при решении нелинейной задачи математического программирования общего вида. Показано, что используемые методы проектирования обеспечивают минимизацию массы конструкций ледовых усиления в районе ледового пояса судна.

Ключевые слова: проектирование ледовых усиления, оптимизационно-поисковое проектирование конструкции, нелинейное программирование, автоматизация, Правила Российского морского регистра судоходства.

Введение

Для обеспечения перевозки грузов по Северному морскому пути необходимы транспортные суда арктических классов различного назначения и размеров. Проектирование таких судов ставит перед инженером ряд проблем, связанных с обеспечением прочности корпусных конструкций при взаимодействии со льдом.

Первой из них является проблема определения расчетных ледовых нагрузок на корпус судна. В правилах классификационных обществ предлагаются аналитические зависимости, по которым можно определить параметры расчетной ледовой

нагрузки — контактное давление [1—4], высоту и длину зоны контакта [1]. Однако продолжаются дискуссии и выполняются научные работы на тему уточнения и совершенствования существующих подходов к расчету этих параметров. Методы расчета ледовых нагрузок, заложенные в основу требований Правил Российского морского регистра судоходства (РМРС), рассмотрены в работах отечественных ученых [5—10]. Зарубежные исследователи [11] подошли к этой проблеме применительно к требованиям Полярных правил (IACS ice-strengthening rules for ships) [4]. Важно отметить исследования [12—14], в которых анализируются экспериментальные данные о параметрах ледовых нагрузок, полученные в ходе полярных экспедиций.

© Тряскин В. Н., Рюмин С. Н., Смирнов Ю. А., Неверовская Л. П., Мороз В. С., 2026

Следующая проблема связана с разработкой методов проектирования конструкций ледовых усилений. Поскольку ледовые нагрузки являются определяющими для элементов корпуса в районах усилений, возникает необходимость создания алгоритмов поиска таких размеров элементов конструкции, которые обеспечивают минимально возможную массу ледовых усилений. Методам оптимизации в проектировании конструкций корпуса посвящены работы [15—20], однако они не учитывают особенности требований к конструкции ледовых усилений корпуса.

Представляют интерес результаты исследования влияния ледового класса судна на массу конструкций ледовых усилений, представленные в [21].

Существенной проблемой также является отсутствие или недостаточная разработка методов автоматизированного формирования расчетных моделей конструкций, подвергающихся ледовым нагрузкам.

Настоящая статья посвящена проблеме автоматизированного проектирования конструкций ледовых усилений судов. Предлагается рассматривать ее в виде задачи математического программирования, для эффективного решения которой рекомендуется использовать поисковый метод прямого перебора. В качестве нормативной базы для определения параметров ледовой нагрузки и требований к элементам конструкции судна в районе ледового пояса приняты требования Правил РМРС. Использование предлагаемых методов демонстрируется на примерах проектирования ледовых усилений бортовых конструкций арктических судов.

Предложен метод создания расчетной модели рассматриваемых конструкций с помощью системы автоматизированного параметрического проектирования САПР-К, разрабатываемой на кафедре конструкции и технической эксплуатации судов Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (СПбГМТУ). Специально для решения задачи проектирования ледовых усилений авторы разработали программный блок «Ледовые усиления», реализующий оптимизационно-поисковые процедуры.

Материалы и методы

Методическая база и предпосылки создания системы автоматизированного параметрического проектирования конструкций САПР-К

Группа специалистов факультета кораблестроения и океанотехники СПбГМТУ имеет многолетний опыт разработки систем автоматизированного параметрического проектирования судовых конструкций. Длительное время используются в практической работе автоматизированные системы, предназначенные для оценки технического состояния конструкций корпуса судов («Syscheck-Ship») и плавучих доков («Syscheck-Dock»), созданные в 2000—2008 гг. [22]. В 2012—2017 гг. по заказу РМРС выполнена разработка автоматизированной системы «Atlas-2D» [23], предназначенной для проверки конструкций корпуса современных тан-

керов и балкеров на предмет соответствия их требованиям гармонизированных Общих правил МАКО (далее — Правила МАКО). В 2021 г. по заказу АО ЦМКБ «Алмаз» разработана автоматизированная система «Алмаз-К», предназначенная для применения в практике конструкторского бюро при проектировании конструкций корпуса судов в соответствии с требованиями Правил РМРС [24]. На аналогичной методологической основе в настоящее время разрабатывается автоматизированная система САПР-К [25], предназначенная для проектирования конструкций крупнотоннажных арктических нефтеналивных судов, газозовов, балкеров, контейнеровозов. В значительной мере при этом используется задел, созданный при разработке системы «Атлас-2D» в части формализации требований Правил МАКО и разработки программного кода. Для проектирования конструкций по требованиям к ледовым усилениям используются результаты исследований, полученные при создании автоматизированной системы «Алмаз-К». В системе САПР-К значительная часть решений наиболее сложных проблем реализуется с использованием оптимизационно-поисковых процедур. Система состоит из развитой базы данных, для формирования которой разработаны специализированные программные средства. Функциональное программное обеспечение позволяет выполнять проверочные расчеты и проектирование конструкций корпуса по требованиям к местной прочности, общей продольной прочности и устойчивости, предельной прочности и усталостной долговечности. Значительное место уделено проблеме проектирования конструкций ледовых усилений.

Масса конструкций ледовых усилений может достигать существенных величин. Оценки показывают, что для арктических судов с категорией усиления корпуса Arc7 масса конструкций ледовых усилений составляет 20—35% [21] от массы корпуса судна без ледовых усилений (большее значение соответствует судам с водоизмещением ~10 тыс. т, а меньшее ~200 тыс. т). Учитывая, что масса корпуса неподкрепленного судна составляет 15—20% от полного водоизмещения, абсолютные значения массы ледовых усилений могут достигать 1—5 тыс. т. В связи с этим правильный выбор формы корпуса судна ледового плавания, рациональная компоновка конструкций ледового пояса, проектирование ледовых усилений с использованием оптимизационно-поисковых процедур могут заметно влиять на снижение массы корпуса и, соответственно, повысить эксплуатационные характеристики судна.

Проектирование конструкций ледовых усилений по требованиям Правил РМРС [1] — достаточно сложная проблема. Для ее решения необходимо предварительно решить трудоемкие задачи, связанные с обработкой теоретического чертежа — определить углы наклона ватерлинии и шпангоутов на уровне расчетной осадки. Действующие Правила регламентируют подготовку таких данных для всего района носового заострения (а для судов двойного

действия [26] — и кормового заострения) с расстоянием между расчетными сечениями не более $0,025L$ (L — длина судна на уровне расчетной осадки).

Расчетные зависимости, по которым определяются требуемые размеры балок основного и рамного наборов в районе ледовых усиления, отличаются значительной сложностью. Требования к набору ледовых усиления приспособлены в основном для проверочных расчетов конструкций, которые некоторым образом предварительно спроектированы. Задача усложняется тем, что в этих требованиях регламентируются не только базовые характеристики профилей (такие как момент сопротивления поперечного сечения и площадь сечения стенки), но и ряд других параметров (толщина и высота стенки, ширина и толщина свободного пояска). Проектирование должно выполняться в иерархической последовательности (снизу вверх), поскольку от принятых значений толщины обшивки ледового пояса, размеров балок основного набора зависят и размеры рамных балок.

Структура программного блока «Ледовые усиления»

Программный блок «Ледовые усиления» реализует два режима: «Подготовка данных» и «Расчеты».

В режиме «Подготовка данных» решаются следующие задачи:

- обработка формы корпуса, заданной в виде карасной модели;
- идентификация типа судна в зависимости от соответствия требованиям Правил РМРС к параметрам формы корпуса для судов ледовых классов;
- выделение районов ледовых усиления по длине судна и по контуру наружной обшивки в соответствии с требованиями Правил РМРС;
- расчет функций формы корпуса и параметров ледовых нагрузок.

Прежде чем переходить к режиму «Расчеты», необходимо подготовить соответствующую базу данных по конструкции ледовых усиления. В автоматизированной системе САПР-К она создается в процессе «Компоновки конструктивной схемы» в виде «Растяжки наружной обшивки» и «Перекрытия».

Рассмотрим подробнее функционирование описанных выше модулей программного блока «Ледовые усиления».

На этапе «Обработка формы корпуса» определяются углы наклона к диаметральной плоскости касательных к ватерлинии и бортовых ветвей шпангоутов к вертикали в заданных точках для расчетной осадки судна: участки ватерлинии и каждого шпангоута аппроксимируются полиномиальными функциями, определяются значения производных, по которым строятся кривые распределения углов наклона ватерлинии $\alpha(x)$ и шпангоутов $\beta(x)$.

Поскольку в большинстве случаев расчетные ватерлинии на длине всего заострения не удается аппроксимировать одним полиномом (особенно кормовые ватерлинии судов двойного действия, оборудованных винто-рулевыми комплексами), процедуры аппроксимации могут выполняться для

участков ватерлинии с последующим «сшиванием» локальных аппроксимаций с отслеживанием условий равенства значений функций и их первых (и вторых) производных в точке «сшивания».

«Идентификация типа судна в зависимости от формы корпуса» в программном комплексе осуществляется путем сопоставления фактических данных о форме корпуса с требуемыми в п. 3.10.1.2.2 Правил РМРС [1]. Этот пункт регламентирует требования к следующим параметрам:

- углу наклона форштевня на уровне расчетной ватерлинии φ_0 ;
- углу входа расчетной ватерлинии α_0 ;
- углу наклона шпангоута на уровне расчетной ватерлинии на расстоянии $0,05L$ от носового перпендикуляра $\beta_{0,05}$;
- углу наклона шпангоута на уровне расчетной ватерлинии на мидель-шпангоуте ($0,5L$ от носового перпендикуляра) $\beta_{0,5}$.

Если форма корпуса соответствует указанным рекомендациям, считается, что судно имеет обводы, «традиционные» для судов ледового плавания с заданным ледовым классом; в противном случае форма корпуса является «нетрадиционной». В зависимости от принадлежности судна к одному из приведенных типов будут использоваться разные формулы для расчета ледовых нагрузок.

Решение задачи «Выделение районов ледовых усиления» предоставляет пользователю возможность наглядно оценить разбивку корпуса на районы ледовых усиления и проверить значения параметров, определяющих это разделение. Результат визуализации для танкера ледового плавания с классом Arc7 показан на рис. 1. В дальнейшем границы зон ледовых усиления будут отображаться и на растяжке наружной обшивки.

«Расчет функций формы» $v(x/L, \alpha, \beta)$ и $u(x/L, \alpha, \beta)$, определяющих распределение ударных ледовых нагрузок по длине носового и кормового заострений, выполняется в зависимости от идентификации типа судна с точки зрения удовлетворения требований к форме корпуса для судна ледового плавания. Для судов с «традиционными» обводами функции формы определяются по формулам, которые применяются в Правилах РМРС длительное время. Для судов с «нетрадиционными» обводами начиная с 2019 г. в требованиях Правил предложены новые формулы, позволяющие более точно учесть влияние на ледовые нагрузки особенностей геометрии корпуса современных судов ледового плавания (большие углы наклона борта и ватерлинии в районе носового, кормового заострения). По специальным рекомендациям с 2020 г. производится расчет функций формы и параметров расчетной ледовой нагрузки для судов с бульбовыми обводами, а также для участков корпуса, где углы наклона ватерлиний α ненулевые, а борт — вертикальный $\beta \cong 0$ [1].

Компоновка конструктивной схемы выполняется в процессе формирования базы данных по конструкции корпуса в режиме: «Корпус / Конструктивная

Рис. 1. Трехмерное представление корпуса крупнотоннажного танкера-челнока (проект 1660) с границами ледовых усилений (выделены по цветам)

Fig. 1. Three-dimensional hull representation of a large-capacity ice-class shuttle tanker (Project 1660) with ice-reinforcement boundaries (marked by color)

компоновка / Перекрытие» с использованием модуля «Редактор конструктивных схем», алгоритм работы которого приведен на рис. 2. В режиме графического диалога с высоким уровнем автоматизации производится выделение листов наружной обшивки, расстановка балок основного и рамного набора. Результаты компоновки конструктивной схемы (рис. 3) в формате, необходимом для организации процедур проектирования, записываются в текстовые файлы определенной структуры. Для контроля сформированной конструктивной схемы предоставлена возможность ее просмотра в 3D визуализации.

В режиме «Расчеты» последовательно решаются задачи проектирования (определения требуемых размеров) элементов конструкций ледовых усилений и производится проверка фактических значений параметров конструкций на предмет соответствия требованиям Правил РМРС. Система САПР-К анализирует каждый отдельный конструктивный элемент в пределах заданной области ледовых усилений, поскольку размеры листовых и балочных элементов, как правило, неодинаковы в силу изменения обводов судна и характера конструктивной схемы усилений. Особенно это важно для элементов конструкции в носовой и кормовой оконечностях, где из-за особенностей формы корпуса балки устанавливаются неравномерно (изменяются расстояние между ними, пролет, угол наклона балок).

Переход к модулю «Ледовые усиления» осуществляется после того, как выполнено проектирование корпусных конструкций по общим требованиям Правил [1] к местной прочности. Согласно принятому алгоритму, система анализирует результаты предыдущего этапа проектирования, и если требования к ледовым усилениям окажутся определяющими, то предыдущие результаты заменяются новыми.

Методики и алгоритмы проектирования ледовых усилений с использованием оптимизационно-поисковых процедур

Проектирование конструкций ледовых усилений корпусов судов ледового плавания и ледоколов выполняется в соответствии с требованиями раздела 3.10 Правил РМРС 2025 г. [1]. Структура рассматриваемых требований такова, что процедура проектирования конструкций может быть реализована в виде проверочного расчета конструкций с известными значениями размеров ее элементов. При этом параметры конструктивной схемы, опре-

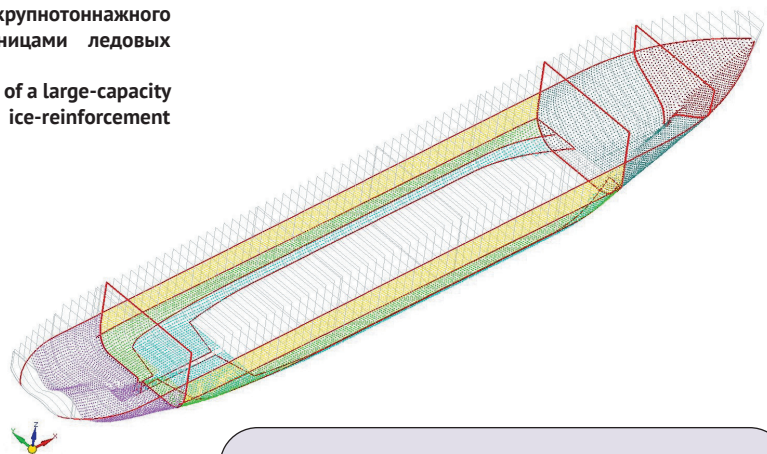


Рис. 2. Алгоритм формирования базы данных по перекрытию
Fig. 2. Algorithm for the grillage database generating

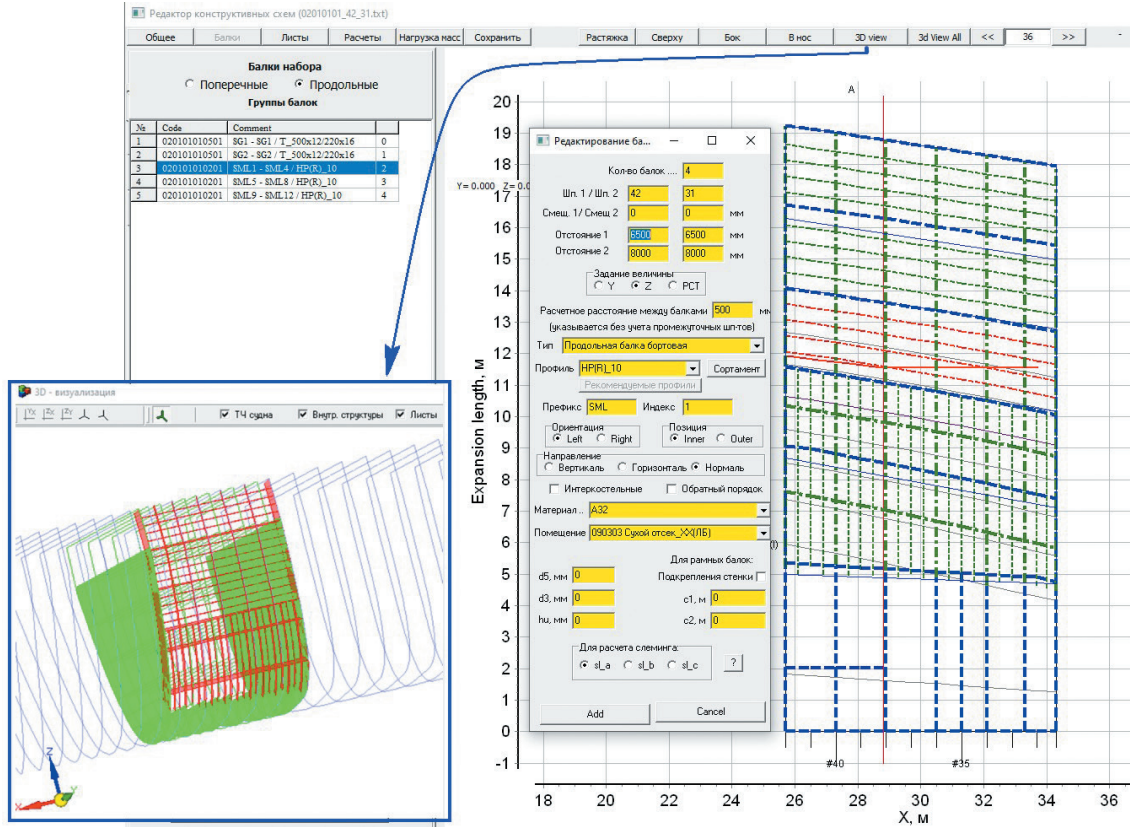


Рис. 3. Результаты компоновки конструктивной схемы
Fig. 3. The layout results of design scheme

деляющие систему набора, взаимное расположение балок основного и рамного наборов, некоторые другие параметры конструкции, а также характеристики материала входят в состав исходной информации.

Процесс проектирования бортовых конструкций в районах ледовых усилений корпуса судна на основе требований Правил РМРС представляет собой иерархическую последовательность процедур. При заданных параметрах топологии конструкции задачи определения требуемых геометрических размеров конструктивных элементов решаются в указанной ниже последовательности:

- для поперечной системы набора: «толщина листов наружной обшивки → размеры обыкновенных шпангоутов → размеры несущих бортовых стрингеров → размеры рамных шпангоутов»;
- для продольной системы набора: «толщина листов наружной обшивки → размеры продольных балок основного набора борта → размеры рамных шпангоутов».

Отдельно решается задача проектирования листовых конструкций, под которыми понимаются участки палуб, платформ, поперечных переборок, примыкающие к борту, вертикальные и горизонтальные диафрагмы двойных бортов, стенки рамных шпангоутов и несущих стрингеров и некоторые другие конструкции.

В результате проведения серии последовательных расчетов можно определить, соответствуют ли тре-

буемые значения толщины листов наружной обшивки, размеры элементов балок основного и рамного набора в конкретном районе ледовых усилений предварительно принятым размерам конструктивных элементов. Однако при таком подходе к проектированию конструкций нельзя утверждать, что конструкции ледовых усилений корпуса судна имеют оптимальные характеристики, например, минимальную массу.

В связи с этим в состав автоматизированной системы включено программное обеспечение, которое реализует оптимизационно-поисковые методы проектирования конструкций [27]. Проблема поискового проектирования элементов конструкций ледовых усилений представляется в общем виде задачей математического программирования:

$$GF(\mathbf{X}) \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях:

$$h_j(\mathbf{X}) = 0, j = 1, \dots, m, \quad (2)$$

$$g_j(\mathbf{X}) \geq 0, j = m + 1, \dots, p \quad (3)$$

и граничных условиях:

$$(x_i)_{\min} \leq x_i \leq (x_i)_{\max}, i = 1, \dots, k, \quad (4)$$

где $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_k]^T$ — вектор-столбец независимых переменных — значений параметров конструкции; $GF(\mathbf{X})$ — функция цели; $h_j(\mathbf{X})$ — ограничения в виде равенств; $g_j(\mathbf{X})$ — ограничения в виде неравенств.

Целевая функция имеет тот или иной вид в зависимости от постановки задачи. Например, она может являться функциональной зависимостью, характеризующей массу, трудоемкость изготовления или стоимость конструкции. Ограничения-равенства позволяют зафиксировать значение некоторой варьируемой переменной или какой-либо характеристики конструкции на заданном уровне. Ограничения-неравенства формируются главным образом на основе требований к ледовым усилениям Правил РМРС. Функция цели и ограничения задачи либо представляются в аналитическом виде, либо определяются численно в итерационных циклах. Граничные условия определяют область допустимых значений варьируемых параметров. Результат решения рассматриваемой задачи — значения параметров конструкции (т. е. координаты вектора независимых переменных), обеспечивающие минимальное значение функции цели.

В настоящей статье в качестве примера рассмотрены задачи поискового проектирования балок основного набора борта при поперечной системе набора в упрощенной постановке, т. е. при заданной конструктивной схеме.

Требования к шпангоутам ($frames \equiv fr$) в действующих Правилах РМРС представляются следующей совокупностью расчетных зависимостей:

- требование к площади сечения стенки A (предельная прочность):

$$A_{act} \geq A_{req} = \frac{8,7 p a b}{R_{eH}} k_2 k_3 k_4 + 0,1 h_{fr} \Delta s;$$

- требование к предельному моменту сопротивления W_u (предельная прочность):

$$W_{u(act)} \geq W_{u(req)} = k_{fr} \frac{250}{R_{eH}} p b a l Y k_k E \omega_{fr};$$

- требования к толщине стенки s_w :

$$s_{w(act)} \geq s_{w(req)} = \max \{ s_{w1(req)}; s_{w2(req)} \};$$

$$s_{w1(req)} = \frac{k_s}{R_{eH}} p a + \Delta s \quad \text{— прочность на смятие};$$

$$s_{w2(req)} = 0,0114 h_{fr(act)} \sqrt{R_{eH}} + \Delta s \quad \text{— местная устойчивость};$$

- требования к ширине пояса c_f :

$$c_{f(act)} \geq c_{f(req)} = \max \{ c_{f1(req)}; c_{f2(req)}; c_{f3(req)} \};$$

$$c_{f1(req)} = 0,0145 R_{eH} \frac{W_{u(req)}}{W_{u(act)}} \times$$

$$\times \sqrt{t_{f(act)} s_{w(act)}} \left(\frac{h_{fr(act)}}{s_{w(act)}} - 0,98 \right) \quad \text{— местная устойчивость};$$

$$c_{f2(req)} = 69,6 s_{w(act)} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{h_{fr(act)}}{t_{f(act)}} (\beta^2 - 0,0029)} \quad \text{— боковая устойчивость};$$

$$c_{f3(req)} = 2,5 t_{f(act)} \quad \text{— конструктивное соотношение}$$

толщины и ширины пояса,

где индексы (act) и (req) означают фактическое и требуемое значения; p и b — расчетное давление и высота зоны контакта со льдом соответственно; a и l — расстояние между шпангоутами и расчетный пролет шпангоута; R_{eH} — предел текучести стали; h_{fr} — высота стенки профиля; Δs и ω_{fr} — параметры, учитывающие влияние износа на характеристики сечения; $t_{f(act)}$ — принятая (фактическая) толщина свободного пояса.

Остальные коэффициенты и параметры учитывают особенности конструкции борта и условий закрепления основных и промежуточных шпангоутов на опорах; коэффициент k_3 , кроме того, является функцией варьируемого параметра a .

Если предполагается, что балки набора будут выполнены из профильного проката, то задача проектирования набора (1)—(4) может быть представлена в следующем виде.

Примем вектор варьируемых переменных $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}^T$ (рис. 4), где x_1 — толщина обшивки ледового пояса, мм; x_2 — расстояние между шпангоутами a , м; x_3 — площадь сечения изолированной балки (сортаментное значение) f_0 , см²; x_4 — предел текучести материала шпангоута R_{eH} , МПа.

В качестве минимизируемой целевой функции примем характеристику массы конструкции — площадь сечения профиля с участком бортовой обшивки шириной a

$$GF(\mathbf{X}) = 10x_1 x_2 + x_3 \rightarrow \min, \text{ см}^2. \quad (5)$$

В качестве ограничений-равенств примем

$$h_1(\mathbf{X}) = x_2 - a_{(act)} = 0, \quad (6)$$

если целесообразно зафиксировать расстояние между шпангоутами в случае, когда конструктивная схема перекрытия задана,

$$h_2(\mathbf{X}) = x_4 - R_{eH(act)} = 0, \quad (7)$$

если целесообразно зафиксировать предел текучести материала.

Ограничения-неравенства, основанные на требованиях Правил РМРС, в общем виде могут быть записаны следующим образом:

$$g_1(\mathbf{X}) = A_{act}(\mathbf{X}) - A_{req}(\mathbf{X}) \geq 0; \quad (8)$$

$$g_2(\mathbf{X}) = W_{u(act)}(\mathbf{X}) - W_{u(req)}(\mathbf{X}) \geq 0; \quad (9)$$

$$g_3(\mathbf{X}) = s_{w(act)}(\mathbf{X}) - s_{w(req)}(\mathbf{X}) \geq 0; \quad (10)$$

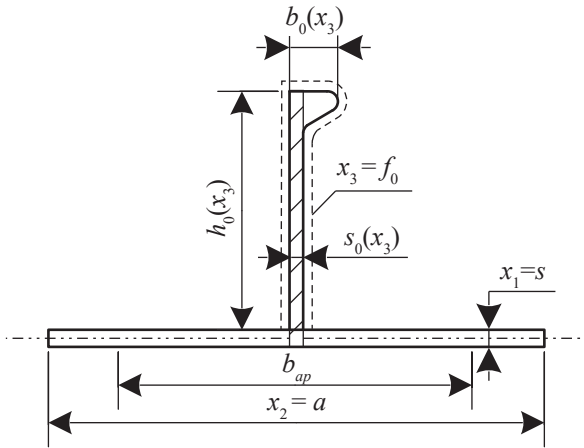


Рис. 4. Площадь, засчитываемая в фактическую площадь стенки A_{act} (указана штриховкой)
 Fig. 4. The area included in the actual wall area A_{act} (shown by shading)

$$g_4(\mathbf{X}) = c_{f(act)}(\mathbf{X}) - c_{f(req)}(\mathbf{X}) \geq 0. \quad (11)$$

Граничные условия для параметров x_1 и x_2 могут быть сформированы на основе неформализованных представлений о проектируемой конструкции. Нижнее и верхнее значения параметра x_3 определяются возможностями используемого сортамента на профильный прокат. Нижнее и верхнее значения четвертого варьируемого параметра — предела текучести стали — определяются возможными значениями этой характеристики для основных корпусных сталей: $x_{4(\min)} = 235$ МПа — сталь нормальной прочности; $x_{4(\max)} = 500$ МПа — сталь повышенной прочности, которая может применяться в конструкциях ледовых усилений судов с высоким ледовым классом и ледоколов.

В случае использования прокатного профиля для балок основного набора ограничения (8)—(11) целесообразно формировать с учетом связей между параметрами профиля (высотой h_0 , толщиной стенки s_0 , шириной головки b_0 , координатой центра тяжести y_0) и площадью сечения изолированного профиля $f_0 \equiv x_3$. Такие связи в виде аппроксимирующих полиномов $h_0(x_3)$, $s_0(x_3)$, $b_0(x_3)$, $y_0(x_3)$ могут быть установлены при обработке данных соответствующего сортамента. В этом случае аппроксимирующие полиномы будут использоваться для вычисления значений ограничений-неравенств (8)—(11) в итерационных циклах поисковой процедуры. Форма аппроксимирующих полиномов учитывает дискретность сортаментных значений характеристик сечения профиля. Эти обстоятельства вносят некоторую степень дискретности и в задачу проектирования балочного элемента. Имеется в виду, что площадь сечения изолированного профиля является непрерывным варьируемым параметром, и ее величина, соответствующая решению задачи, близка к одному из сортаментных значений, но не равна ему точно [15].

Если предполагается, что балки набора будут выполнены из сварного профиля, то задача проектирования набора (1)—(4) примет следующий вид: вектор варьируемых переменных

$$\mathbf{X} = \{x_i\}^T, \quad i = 1, \dots, 7,$$

где x_1 — толщина обшивки ледового пояса s , мм; x_2 — расстояние между шпангоутами a , м; x_3 — высота стенки балки h_0 , см; x_4 — толщина стенки балки s_0 , мм; x_5 — толщина свободного пояска t_p , мм; x_6 — ширина свободного пояска b_p , см; x_7 — предел текучести материала шпангоута R_{elP} , МПа.

В качестве минимизируемой целевой функции (как и в случае с сортаментным профилем) принята характеристика массы конструкции

$$GF(\mathbf{X}) = 10x_1x_2 + 0,1(x_3x_4 + x_5x_6) \rightarrow \min. \quad (12)$$

В качестве ограничений-равенств примем:

$$h_1(\mathbf{X}) = x_2 - a_{(act)} = 0 \quad (13)$$

фиксированное расстояние между шпангоутами;

$$h_2(\mathbf{X}) = x_7 - R_{elP(act)} = 0 \quad (14)$$

фиксированное значение предела текучести материала.

Ограничения-неравенства оставляем в форме (8)—(11).

Целевые функции (5), (12) и ограничения (8)—(11) в задаче проектирования конструкций ледовых усилений являются нелинейными функциями вектора варьируемых переменных. В процессе разработки программного обеспечения автоматизированной системы САПР-К анализировалась эффективность применения различных методов решения задач нелинейного программирования: метода Нелдера — Мида, дополненного алгоритмом скользящего допуска, метода сопряженных градиентов, метода квадратичного программирования [15]. Показано, что не во всех случаях применение программного обеспечения, реализующего эти методы, обеспечивает нахождение глобального минимума целевой функции. Кроме того, эти методы работают с непрерывными варьируемыми переменными. Параметры конструкции являются заведомо дискретными, поскольку связаны с сортаментами на листовую и профильный прокат, ограниченным количеством марок стали и соответственно ограниченным выбором предела текучести. Линейные размеры элементов балок (высота стенки, ширина свободного пояска) также принимаются в соответствии с рядом предпочтительных значений.

Для использования в практике конструкторских бюро предлагается специализированное программное обеспечение, реализующее метод прямого перебора по алгоритму, представленному на рис. 5. Количество расчетных итераций зависит от числа варьируемых параметров и заданных для них шагов дискретизации. Число итераций зависит также от числа ограничений-равенств, фиксирующих значе-

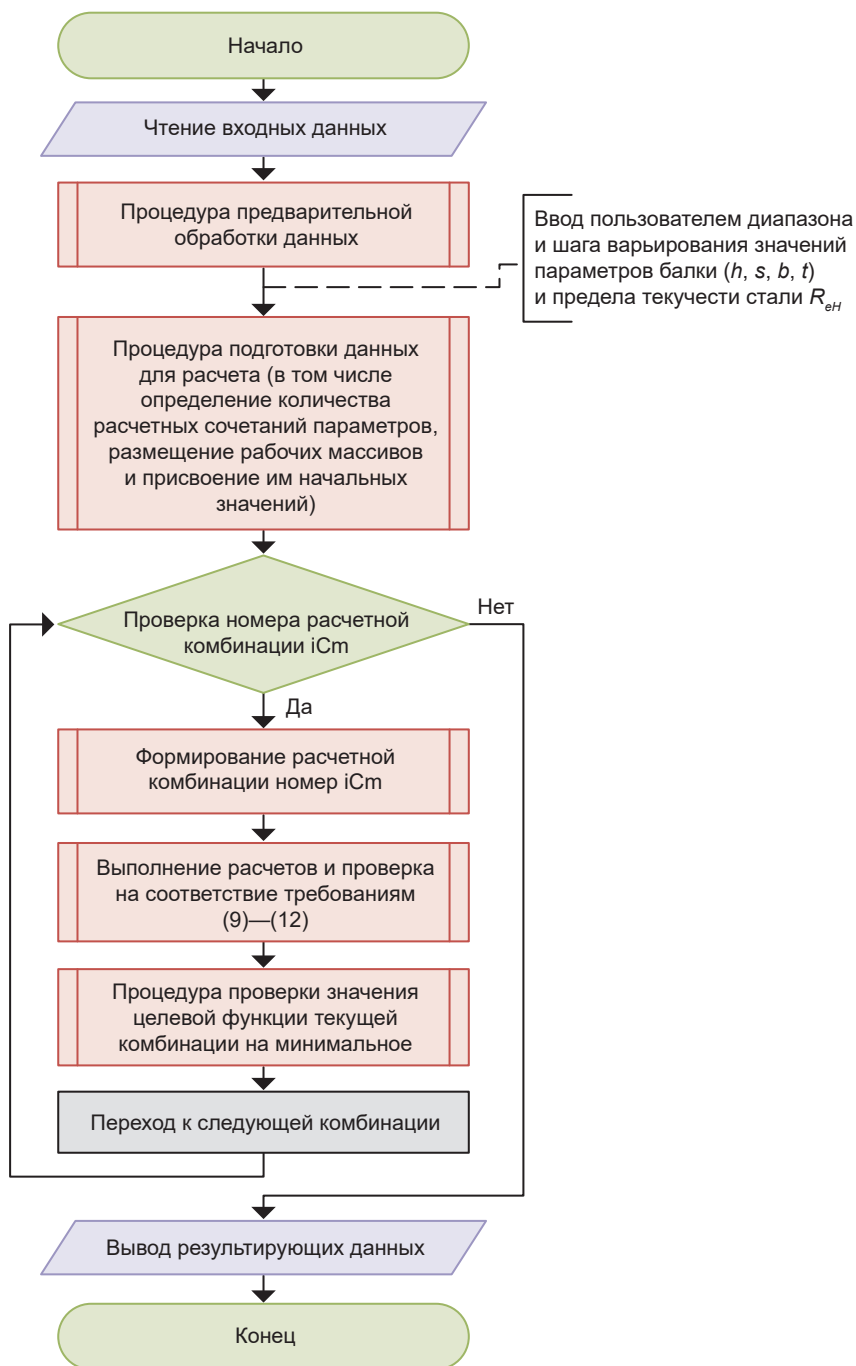


Рис. 5. Алгоритм проектирования балок основного набора методом прямого перебора
 Fig. 5. Algorithm for designing stiffeners of the main set using the direct enumeration method

ние некоторых параметров конструкции и уменьшающих число возможных комбинаций конструктивных параметров. Поскольку количество варьируемых параметров в задачах проектирования конструкций ледовых усилений изменяется в диапазоне от 4 до 7, максимальное число итераций составит 10^3 — 10^8 . При этом гарантируется достижение глобального минимума целевой функции для заданных граничных условий и шага, поскольку каждое решение, лежащее в допустимой области, последовательно проверяется.

Результаты и обсуждение

Задача проектирования ледовых усилений решена для балок основного набора бортовых перекрытий с поперечной системой набора двумя методами:

- методом прямого перебора в системе САПР-К;
- посредством компоновки задачи математического программирования в MS Excel.

Для случая, когда рассматриваемые балки выполнены из прокатного профиля, производится решение задачи (5)—(11) на примере проектирования шпангоутов арктического судна ледового плавания

с категорией ледовых усилений Arc4. Исходные данные для расчета таковы:

- **параметры ледовой нагрузки:**
 расчетное водоизмещение $\Delta = 5624$ т;
 категория ледовых усилений $Ice_Cat = Arc4$;
 район ледовых усилений $Ice_Area = A1$;
 район по длине судна $Fr = 135-147$;
 расчетное давление $p = 1569$ кПа;
 расчетная высота зоны контакта $b = 0,512$ м;
- **дополнительные исходные данные:**
 фиксированное значение расстояния между шпангоутами $a_{(act)} = 0,4$ м для ограничения (6);
 фиксированное значение предела текучести стали $R_{eH(act)} = 355$ МПа для ограничения (7).

Решение задачи в рамках системы САПР-К методом прямого перебора по сортаменту приводит к следующему результату:

- всем ограничениям Правил РМРС (8)—(11) отвечает несимметричный полосоульба 186;
- площадь сечения изолированного профиля $f_0 \equiv x_3 = 25,8$ см².

Решение задачи (5)—(11) с использованием инструмента MS Excel «Поиск решения» приведено в табл. 1 и 2. При этом нижнее значение параметра $x_3 - x_{3(min)}$ необходимо корректировать в процессе реализации поисковой процедуры. Условие $f_{0(min)} = x_{3(min)}$ будет достигаться при равенстве требуемой и фактической площадей стенки балки $A_{act}(\mathbf{X}) = A_{req}(\mathbf{X})$:

$$\begin{aligned} & (h_0(x_3) + 0,1x_1)0,1s_0(x_3) - 0,1\Delta s_0,84h_0(x_3) = \\ & = 8,7pbk_2k_4 \frac{x_2}{x_4} k_3(x_2). \end{aligned} \quad (15)$$

Подставив в зависимость (15) полиномиальные аппроксимации для параметров прокатного профиля $h_0(x_3)$ и $s_0(x_3)$, можно получить зависимость для определения $x_{3(min)}$ в аналитическом виде как функцию параметров x_1, x_2, x_4 .

С учетом функциональных связей между параметрами сечения полосоульбового профиля и характеристикой сечения $f_0 \equiv x_3$ минимум целевой функции соответствует $x_3 = 24,14$ см². Ближайшее большее сортаментное значение $f_0 = 25,8$ см², что согласуется с расчетами САПР-К. При переходе к сортаментному значению $x_3 = 25,8$ см² может происходить нарушение некоторых ограничений задачи, например, требований к ширине свободного пояса или к толщине стенки балки. Для учета этого обстоятельства сле-

дует провести дополнительный проверочный расчет. Процедура прямого перебора исключает эту необходимость.

Отличается и время, затрачиваемое на выполнение расчетов. В MS Excel оно составило 0,44 с (замерено с помощью макросов Visual Basic), в САПР-К — 0,005 с. Существенное отличие в скорости решения можно объяснить различной трудоёмкостью итерации для методов, используемых в MS Excel и в САПР-К. Для последнего число итераций при изготовлении балки из несимметричного полосоульба не превышает количества типоразмеров в сортаменте.

Таблица 1. Параметры задачи и решение

Table 1. Problem parameters and solution

Этап решения	s, мм	a, м	f ₀ , см ²	R _{eH} , МПа
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄
Верхняя граница	30,0	0,900	43,55	390
Нижняя граница	9,0	0,300	10,10	235
Решение	14,0	0,400	24,14	355
Принятые значения	14,0	0,400	25,80	355

Решение задачи (8)—(12) в случае использования балок сварного таврового профиля демонстрируется на примере проектирования шпангоутов для судна с более высокой категорией ледовых усилений Arc7. Исходные данные для расчета:

Таблица 2. Значения функции цели и ограничений для точного решения и для профиля по сортаменту

Table 2. Values of the objective function and constraints for the exact solution and for the profile by assortment

Показатель	Решение MS Excel	Проверка для принятого профиля	Единица измерения
Функция цели:			
$GF(\mathbf{X}) = 10x_1x_2 + x_3$	80,1	81,8	см ²
Ограничения-равенства:			
$h_1(\mathbf{X}) = x_2 - a_{(act)} = 0$	0,0	0,0	см
$h_2(\mathbf{X}) = x_4 - R_{eH(act)} = 0$	0,0	0,0	МПа
Ограничения-неравенства:			
$g_1(\mathbf{X}) = A_{act}(\mathbf{X}) - A_{req}(\mathbf{X}) \geq 0$	9,84	11,1	см ²
$g_2(\mathbf{X}) = W_{u(act)}(\mathbf{X}) - W_{u(req)}(\mathbf{X}) \geq 0$	0,0	30,7	см ³
$g_3(\mathbf{X}) = b_{f(act)}(\mathbf{X}) - b_{f(req)}(\mathbf{X}) \geq 0$	0,2	0,3	см
$g_4(\mathbf{X}) = s_{w(act)}(\mathbf{X}) - s_{w(req)}(\mathbf{X}) \geq 0$	5,0	5,0	мм

- **параметры ледовой нагрузки:**
 расчетное водоизмещение $\Delta = 162\,765$ т;
 категория ледовых усилений $Ice_Cat = Arc7$;
 район ледовых усилений $Ice_Area = BI$;
 район по длине судна $Fr = 138—144$;
 расчетное давление $p = 5159$ кПа;
 расчетная высота зоны контакта $b = 1,750$ м;
 - **дополнительные исходные данные:**
 фиксированное значение расстояния между шпангоутами: $a_{(act)} = 0,49$ м для ограничения (13);
 фиксированное значение предела текучести стали: $R_{eH(act)} = 390$ МПа для ограничения (14).
 Интерфейс программного модуля САПР-К и решение задачи нелинейного программирования (8)—(12) методом прямого перебора представлен на рис. 6 и 7. Результаты таковы:
 - всем ограничениям Правил РМРС (8)—(11) отвечает тавровый профиль $200 \times 29/80 \times 30$;
 - площадь сечения изолированного профиля $f_0 \equiv x_3 = 82,0$ см².
- Применение инструмента MS Excel «Поиск решения» для решения задачи (8)—(12) не позволило получить удовлетворительный результат. Это связано с методом обобщенного градиента, который использует программа для поиска минимума целевой функции. Поскольку он «чувствителен» к выбору начальных условий, «плохой» выбор исходных значений переменных $x_1—x_7$ может привести к не-

верному решению (когда найден локальный, а не глобальный минимум) или к неудовлетворительной сходимости, что и произошло в конкретном примере.

Время решения поисковой задачи для балочного элемента с помощью САПР-К составило 1,28 с при 109 512 возможных сочетаний параметров $x_1—x_7$ (для компьютера с процессором AMD Ryzen 7 5700X 8-core 3.4 GHz). Наибольший интерес представляет оценка скорости работы программного обеспечения при проведении массовых, а не единичных расчетов, например, при проектировании шпангоутов в отсеках носовой оконечности со сложным взаимным расположением элементов конструкции.

Для рассматриваемого в примере судна с водоизмещением 162,7 тыс. т в районе носовой оконечности в пределах двух отсеков общей длиной около 50 м (район ледовых усилений А, А1) обыкновенные шпангоуты разбиваются платформами и несущими стрингерами на 1500 балочных элементов.

Выполнение расчета ледовых усилений поперечных балок обыкновенного набора для такого бортового перекрытия может составить около 32 мин.

Если проводить расчет того же перекрытия, но с выполнением шпангоутов из стандартных профилей, время сокращается до десятка секунд.

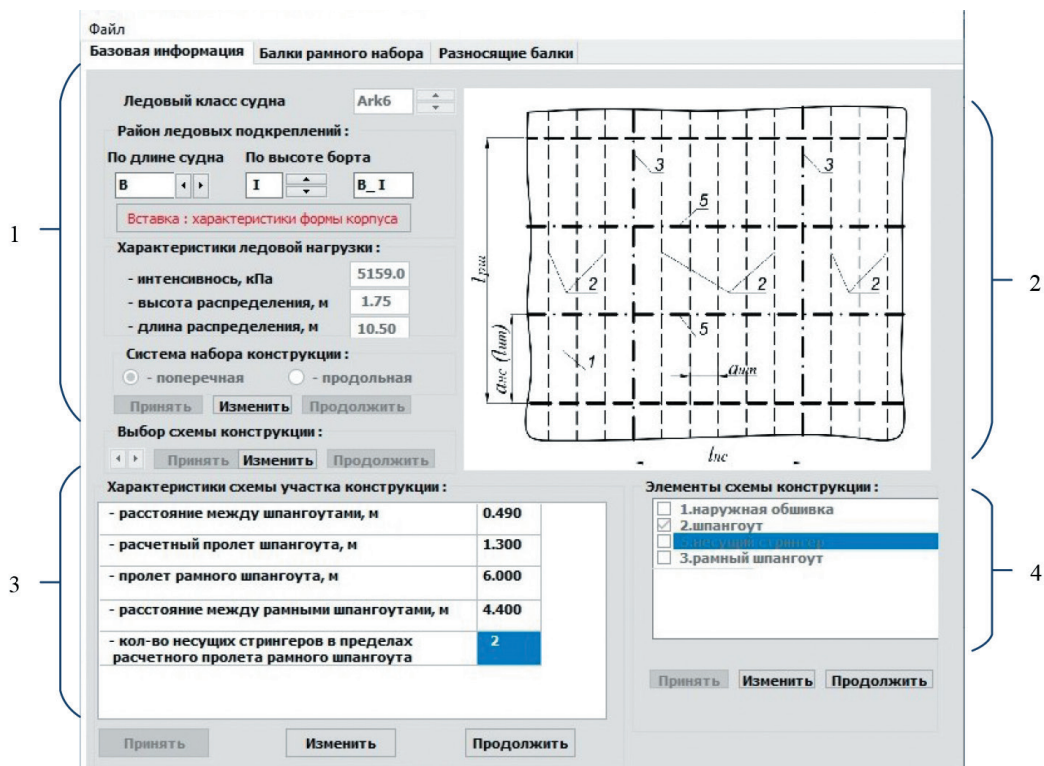


Рис. 6. Исходные данные для проектирования шпангоутов в модуле «Ледовые усиления»: 1 – ледовый класс, расчетный район ледовых усилений и параметры ледовой нагрузки; 2 – схема перекрытия; 3 – информация о перекрытии; 4 – выбор расчетного элемента конструкции

Fig. 6. Initial data for calculation of side stiffeners (frames) in the Ice strengthening module: 1 – ice class, calculation area of ice strengthening and ice load parameters; 2 – grillage scheme; 3 – information about grillage; 4 – selection of structural element

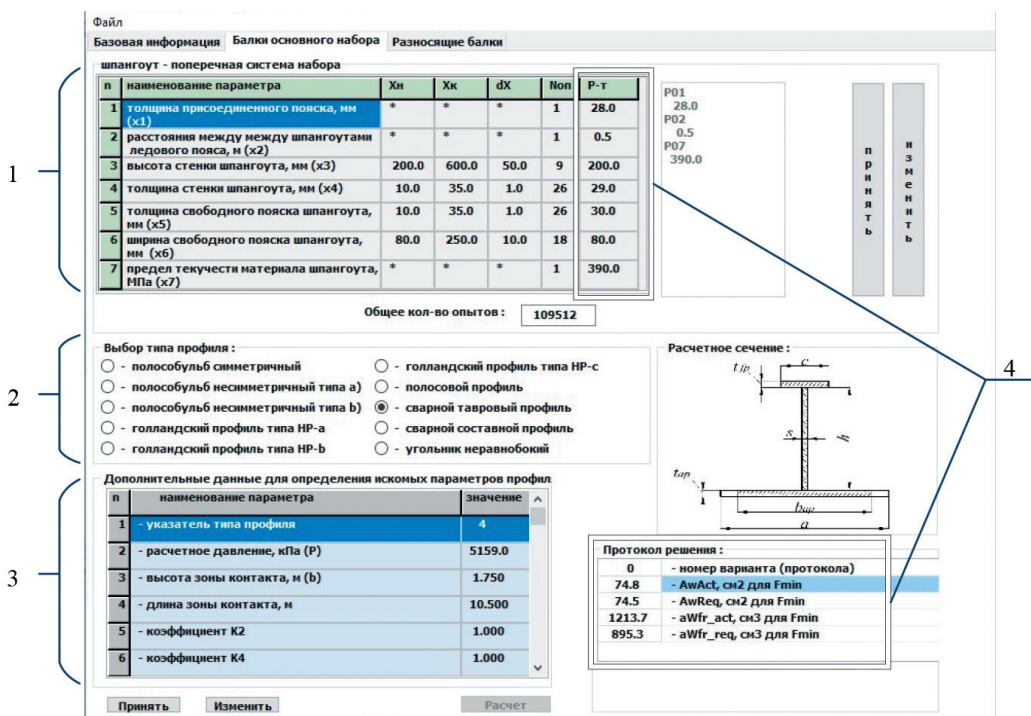


Рис. 7. Результаты расчета шпангоута в модуле «Ледовые усиления»: 1 – граничные условия; 2 – выбор типа профиля; 3 – дополнительная информация для вычислений; 4 – результаты расчета
 Fig. 7. Calculation results for side stiffeners (frames) in the Ice strengthening module: 1 – boundary conditions; 2 – profile type selection; 3 – additional information for calculation; 4 – calculation results

Выводы

В статье рассмотрены основные проблемы, возникающие при проектировании конструкций ледовых усилений судов ледового плавания. Отмечается, что существенной проблемой являются высокая трудоемкость, отсутствие или недостаточная разработка общепринятых методов формирования расчетной модели конструкций, подвергающихся ледовым нагрузкам. Достаточно сложная система зависимостей, регламентирующих требуемые размеры элементов конструкций ледовых усилений, многовариантность возможных решений обуславливают целесообразность применения оптимизационно-поисковых методов для реализации проектировочных процедур.

Продемонстрировано успешное применение программного обеспечения разработанной в СПбГМТУ системы автоматизированного параметрического проектирования САПР-К при решении комплекса задач подготовки исходных данных для проектирования ледовых усилений: создания геометрической модели корпуса судна, выделения районов ледовых усилений по заданному ледовому классу, обработки формы корпуса с целью определения геометрических параметров, определяющих расчетные ледовые нагрузки, подготовки расчетной модели конструкции корпуса и формирования базы исходных данных. Автоматизация этих процедур позволяет значительно со-

кратить трудоемкость проектирования конструкции судна ледового плавания.

Предложена постановка задачи проектирования конструкций ледовых усилений в общем виде задачи нелинейного программирования. Обоснована целесообразность применения для решения задачи нелинейного программирования метода прямого перебора.

Показана эффективность такого методического подхода на примерах проектирования бортовых конструкций арктических судов в районе ледового пояса с использованием специализированного блока «Ледовые усиления» автоматизированной системы САПР-К.

Программное обеспечение, базирующееся на этих методических основах, предназначено для использования в практике конструкторских бюро при проектировании судов ледового плавания и ледоколов.

Литература/References

1. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. — Ч. 2: Корпус. — СПб., 2025. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for classification and construction of sea-going ships. Pt. 2: Hull. Saint Petersburg, 2025. (In Russian).
2. Ice Class Regulations and the Application Thereof. № TRAFICOM/68863/03.04.01.00/2021, Finnish Transport and Communications Agency, 2021.

3. China Classification Society. Rules for Classification of Sea-Going Steel Ships. Part two "Hull", 2024.
4. IACS Requirements concerning Polar Class. I2 Structural Requirements for Polar Class Ships, Rev. 4, Dec 2019.
5. Курдюмов В. А., Хейсин Д. Е. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед. — Ч. 12 // Прикладная механика. — 1976. — Вып. 10. — С. 103—109. Kurdyumov V. A., Hejsin D. E. Gidrodinamicheskaya model' udara tverdogo tela o led. Pt. 12 [Hydrodynamic Model of Solid Body Impact on Ice]. Prikladnaya mekhanika [Kiev], 1976, iss. 10, pp. 103—109. (In Russian).
6. 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. Kurdyumov V. A., Hejsin D. E. Opredelenie nagruzok pri udare sudna vertikalnym bortom o kromku ledyanogo polya [Determination of loads when vessel's hull impacts of the vertical side with the edge of the ice field], Nauchno-tekhnicheskii sbornik Registra SSSR, 1984, iss. 14, pp. 3—10. (In Russian).
7. Апполонов Е. М., Платонов В. В., Тряскин В. Н. Развитие методов определения ледовых нагрузок и требований к конструкциям ледовых усилений // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 1 (37). — С. 65—81. Appolonov E. M., Platonov V. V., Tryaskin V. N. Development of methods for determining ice loads and requirements for ice reinforcement structures. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 1 (37), pp. 65—81. (In Russian).
8. 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. — № 51. — С. 17—23. Appolonov E. M., Platonov V. V., Tryaskin V. N. Ice load assignment procedure for bows of ships with vertical sides and bulbous lines. Transactions of the Krylov State Research Centre, 2019, Special Ed. 1, pp. 17—23. (In Russian).
9. Свистунов И. А., Платонов В. В., Тряскин В. Н. Методика определения расчетных ледовых нагрузок на конструкции крупнотоннажных стоечных судов // Тр. Крылов. гос. науч. центра. — 2021. — № 1 (395). — С. 35—41. Svistunov I., Platonov V., Tryaskin V. Calculation procedure for design structural loads on large berth-connected ships. Transactions of the Krylov State Research Centre, 2021, no. 1 (395), pp. 35—41. (In Russian).
10. 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. 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. (In Russian).
11. Kim E., Amdahl J., Wang Xintong. Making sense of speed effects on ice crushing pressure-area relationships in IACS ice-strengthening rules for ships. Ocean Engineering, 2021, vol. 230, p. 109059.
12. Свистунов И. А., Фильчук К. В., Бакланов А. В. и др. Макромасштабные экспериментальные исследования ледовых сжатий в Северном Ледовитом океане в период первого дрейфа ледостойкой самоходной платформы «Северный полюс» в составе полярной дрейфующей станции «Северный полюс-41» в 2022—2023 гг. // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 2. — С. 274—285. Svistunov I. A., Filchuk K. V., Baklanov A. V., Raev D. L., Stribny O. Yu., Gavrilov Yu. G. Macroscale experimental studies of ice compression in the Arctic Ocean during the first drift of the ice-resistant self-propelled platform "North Pole" as part of the polar drifting station "North Pole-41" in 2022—2023. Arctic: Ecology and Economy, 2024, vol. 14, no. 2, pp. 274—285. (In Russian).
13. Wu G., Kong S., Tang W., Lei R., Ji S. Statistical analysis of ice loads on ship hull measured during Arctic navigations. Ocean Engineering, 2021, vol. 223, p. 108642.
14. Jeon M., Choi K., Min J., Ha J. Estimation of local ice load by analyzing shear strain data from the IBRV ARAON's 2016 Arctic voyage. Intern. J. of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2018, vol. 10, iss. 3, pp. 421—425.
15. Гарин Э. Н. Поисковые методы в проектировании судовых корпусных конструкций, устройств и систем: Учебное пособие. — СПб.: СПбГМТУ, 2006. — 118 с. Garin E. N. Poiskovyie metody v proektirovanii sudovykh korpusnykh konstruksii, ustroistv i system: Uchebnoe posobie [Search methods in designing ship hull structures, devices and systems: Training aid]. Saint Petersburg, SPbSMTU, 2006, 118 p. (In Russian).
16. Родионов А. А. Математические методы проектирования оптимальных конструкций судового корпуса. — Л.: Судостроение, 1990. — 248 с. Rodionov A. A. Matematicheskie metody proektirovaniya optimal'nykh konstruksii sudovogo korpusa [Mathematical methods of designing optimal ship hull structures]. Leningrad, Sudostroenie, 1990. (In Russian).
17. Kim D. H., Paik J. K. Ultimate limit state-based multi-objective optimum design technology for hull structural scantlings of merchant cargo ships. Ocean Engineering, 2017, vol. 129, pp. 318—334.
18. Wang Y., Wu J. M. Mid-Section Structure Optimization of Oil Tanker Based on CSR Prescriptive Analysis. EngOpt 2018 Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization. [S. I.], Springer Intern. Publ., 2019, pp. 1205—1215.

19. Na S. S., Karr D. G. Development of Pareto strategy multi-objective function method for the optimum design of ship structures. Intern. J. of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2016, 8 (6), pp. 602—614.
20. Nobukawa H., Zhou G. Discrete Optimization of Ship Structures with Genetic Algorithms. J. of the Society of Naval Architects of Japan, 1996, 179, pp. 293—301.
21. Апполонов Е. М., Таровик О. В. Расчетная методика оценки влияния ледовой категории, формы корпуса и конструктивных особенностей на весовые характеристики судов ледового плавания // Тр. Центр. науч.-исслед. ин-та им. академика А. Н. Крылова. — 2012. — № 70 (354). — С. 99—116.
- Appolonov E. M., Tarovik O. V. Raschetnaya metodika otsenki vliyaniya ledovoi kategorii, formy korpusa i konstruktivnykh osobennostei na vesovye kharakteristiki sudov ledovogo plavaniya [Calculation methodology for assessing the influence of ice class, hull form and design features on weight characteristics of ice-going vessels]. Transactions of the Krylov State Research Centre, 2012, no. 70 (354), pp. 99—116. (In Russian).
22. Тряскин В. Н., Лам Ван Хунг. Научно-методические основы алгоритмов определения технического состояния корпуса судна по требованию нормативных документов классификационных организаций // Мор. вестн. — 2007. — № 4 (24). — С. 94—97.
- Tryaskin V. N., Lam Van Hung. Nauchno-metodicheskie osnovy algoritmov opredeleniya sostoyaniya korpusa sudna po trebovaniyu normativnykh dokumentov klasifikatsionnykh organizatsii [Scientific and methodological foundations of algorithms for determining the technical condition of ship according to the requirements of regulatory documentation of assigning authority]. Morskoj Vestnik, 2007, no. 4 (24), pp. 94—97. (In Russian).
23. Рюмин С. Н., Тряскин В. Н. Методические основы и алгоритмы программного блока проверочного расчета усталостной долговечности в автоматизированной системе «АТЛАС» // Тр. Крылов. гос. науч. центра. — 2019. — № S1. — С. 29—37.
- Ryumin S. N., Tryaskin V. N. Methodical fundamentals and algorithms of software module for verification of fatigue life calculations in Atlas automated system. Transactions of the Krylov State Research Centre, 2019, Special Ed. 1, pp. 29—37. (In Russian).
24. Кульцеп А. В., Манухин В. А., Плотников К. В. и др. Модернизация программы конечно-элементного анализа стержневых систем FESTA-2020 для использования в автоматизированной системе проектирования судовых конструкций «АЛМАЗ-К» // Тр. Крылов. гос. науч. центра. — 2020. — № S2. — С. 97—102.
- Kultsep A., Manukhin V., Plotnikov K., Ryumin S., Tryaskin V. Upgrade of FEM-based software for analysis of FESTA-2020 rod system to be applied in CAD system ALMAZ-K for structural ship design. Transactions of the Krylov State Research Centre, 2020; Special Ed. 2, pp. 97—102. (In Russian).
25. Ryumin S., Tryaskin V. Computer-Aided System for Parametric Design of Ship Hull Structures—CADs-Hull. Machines, 2022; 10, 262.
26. Платонов В. В., Тряскин В. Н. Архитектурно-конструктивные особенности арктических судов двойного действия // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 3 (35). — С. 84—96.
- Platonov V. V., Tryaskin V. N. Architectural and structural features of Arctic double-acting vessels. Arctic: Ecology and Economy, 2019, no. 3 (35), pp. 84—96. (In Russian).
27. Тряскин В. Н. Методология автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.08.03. — СПб., 2007. — 339 с.
- Tryaskin V. N. Metodologiya avtomatizirovannogo proektirovaniya konstruksii korpusa sudna [Methodology of computer-aided design of ship hull structures]: Dissertation of ... Doctor of Engineering Science: 05.08.03. Saint Petersburg, 2007.

Информация об авторах

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: vladimir.tryaskin@smtu.ru.

Рюмин Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра проектирования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3), e-mail: rumin@smtu.ru.

Смирнов Юрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3), e-mail: smirks@yandex.ru.

Неверовская Лилия Павловна, заведующая лабораторией, кафедра конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3), e-mail: never_55@mail.ru.

Мороз Вера Сергеевна, аспирантка, кафедра конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3), e-mail: moroz@smtu.ru.

DESIGN OF ICE STRENGTHENING FOR ICE-GOING VESSELS AND ICEBREAKERS BASED ON THE REQUIREMENTS OF THE RULES OF RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING IN SPECIALIZED SOFTWARE

Tryaskin, V. N., Ryumin, S. N., Smirnov, Yu. A., Neverovskaya, L. P., Moroz, V. S.

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

The article was received on January 11, 2025

For citing

Tryaskin V. N., Ryumin S. N., Smirnov Yu. A., Neverovskaya L. P., Moroz V. S. Design of ice strengthening for ice-going vessels and icebreakers based on the requirements of the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping in specialized software (CADS-Hull system). *Arctic: Ecology and Economy*, 2026, vol. 16, no. 2, pp. 300—313. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-300-313. (In Russian).

Abstract

The paper presents a mathematical formulation of the ice-strengthening design problem based on the requirements of the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping (RMRS) for side structures with transverse framing system. The authors propose algorithms for solving the problem using rolled section and welded composite sections for the manufacture of main stiffeners (frames). They consider the methodology for generating the initial data by using the CADS-Hull automated parametric design system developed at the Department of Ship Design and Technical Operation of St. Petersburg Marine Technical University. The authors substantiate the feasibility, expediency and effectiveness of using a direct enumeration algorithm for solving the general nonlinear mathematical programming problem. Thus, it is shown that the applied design methods minimize the mass of ice strengthening structures in the area of the vessel's ice belt.

Keywords: *ice strengthening design, optimization and search design of structures, nonlinear programming, automation, Rules of the Russian Maritime Register of Shipping.*

Information about the authors

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

Ryumin, Sergey Nikolaevich, PhD of Engineering Science, associate professor, Ship Design Department, State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya St., St. Petersburg, Russia, 190121), e-mail: rumin@smtu.ru.

Smirnov, Yuriy Aleksandrovich, PhD of Engineering Science, associate professor, Ship Structure and Operation Department, State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya St., St. Petersburg, Russia, 190121), e-mail: smirkks@yandex.ru.

Neverovskaya, Liliya Pavlovna, Head of Laboratory, Ship Structure and Operation Department, State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya St., St. Petersburg, Russia, 190121), e-mail: never_55@mail.ru.

Moroz, Vera Sergeevna, Postgraduate, Ship Structure and Operation Department, State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya St., St. Petersburg, Russia, 190121), e-mail: moroz@smtu.ru.

© Tryaskin V. N., Ryumin S. N., Smirnov Yu. A., Neverovskaya L. P., Moroz V. S., 2026