

*На правах рукописи*



Филатов Антон Романович

**МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ОПТИМИЗАЦИИ  
ТОПОЛОГИИ, РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ**

05.08.01 Теория корабля и строительная механика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Крыловский государственный научный центр» на отделении прочности и надежности конструкций объектов морской техники.

Научный руководитель:

**Крыжевич Геннадий Брониславович**  
доктор технических наук, профессор  
начальник сектора прочности и конструкции  
высокоскоростных судов и технических  
средств освоения шельфа ФГУП «Крылов-  
ский государственный научный центр»

Официальные оппоненты:

**Санников Владимир Антонович**  
доктор технических наук, доцент  
заведующий кафедрой механики деформи-  
руемого твердого тела

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

**Кутенев Андрей Александрович**

кандидат технических наук  
заместитель главного инженера

АО «ЦМКБ «Алмаз»

Ведущая организация:

Акционерное общество «Центральный  
научно-исследовательский институт мор-  
ского флота»

Защита состоится «16» апреля 2021 г. в 10-00 на заседании диссертационно-го совета Д 411.004.02 при ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по адресу: 196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (<https://krylov-centre.ru/about/councils/obyavleniya-ob-otkrytykh-zashchitakh/>).

Автореферат разослан «04» февраля 2021 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 411.004.02  
кандидат технических наук, доцент

О.В. Малышев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

При создании нового проекта конструктор, как правило, ориентируется на ближайший прототип и выполняет его переработку под заданные в проекте технические и функциональные характеристики. При таком подходе вновь получаемые конструкции являются в некоторой степени повторением уже имеющихся аналогов и большинство отличий носят локальный характер. Плюсы традиционного подхода заключаются в надёжности получаемых конструкторских решений, имеющих основание на многолетнем накопленном опыте проектирования и эксплуатации. Минусы состоят, во-первых, в необходимости иметь тот самый накопленный опыт, что невозможно при создании принципиально новых изделий, и, во-вторых, в низкой вероятности появления прорывных конструкторских решений, которая больше всего зависит от творческих способностей самого конструктора. Исправить перечисленные недостатки в значительной степени можно с помощью топологической оптимизации – специального раздела математического программирования, связанного с поиском рационального распределения материала в заданной области пространства, что помогает компенсировать отсутствие конструкторского опыта при проектировании принципиально новых изделий и позволяет пересмотреть существующие технические решения. Работа направлена на создание метода проектирования судовых конструкций, стимулирующего разработку новых прорывных конструктивных решений.

### **Степень разработанности темы исследования**

Оптимизация при подборе прочных размеров связей в науке строительной механики корабля появляется уже на заре её становления в начале XX в. в классических трудах И.Г. Бубнова и П.Ф. Папковича, учеников акад. А.Н. Крылова. В течение всего XX в. широчайшее развитие получают различные методы математического программирования, позволяющие эффективно решать не только линейные, но и выпуклые, а также нелинейные задачи, которые находят своё применение в судостроении при решении задач параметрической оптимизации, касающейся не только подбора прочных размеров связей, но и снижения сопротивления судна, что отражено в работах А.А. Родионова, В.Н. Тряскина, М.Ю. Миронова и других отечественных учёных. Однако при выполнении параметрической оптимизации с большим числом параметров возникают существенные проблемы со сходимостью и сложности с поиском глобального экстремума, что ограничивает возможности её применения для поиска оптимальной топологии конструкции. В конце XX в. наблюдается мощный толчок в развитии методов топологической оптимизации, которая в начале XXI в. из теоретической дисциплины становится прикладной, что спровоцировало огромный интерес инженеров и конструкторов к её применению при проектировании силовых конструкций, особенно в авиации и космо-

навтике, где наиболее остро стоит вопрос рационального использования каждого грамма материала. Помимо указанных отраслей промышленности применение топологической оптимизации наблюдается в строительстве, машиностроении, автомобилестроении, а в 2010-х гг. и в судостроении, но в весьма ограниченном числе исследовательских задач без дальнейшего практического применения при проектировании. Также в конце XX в. одновременно с топологической оптимизацией развивается направление оптимизации формы, основной целью которой является снижение концентрации напряжений в конструкции. На текущий момент использование оптимизации формы в судостроении не наблюдается, однако её применение позволит увеличить ресурс корпусных конструкций, что благоприятно отразится на стоимости и сроках ремонта судового корпуса. Вместе с тем отсутствует комплексный подход к оптимизации конструкций, сочетающий в себе три описанных выше вида оптимизации, который с использованием современных алгоритмов позволил бы в короткие сроки находить такие оптимальные решения, отыскание которых с применением традиционного подхода подчас невыполнимо.

### **Цели и задачи**

Целью настоящей работы является разработка и апробация метода проектирования судовых конструкций с использованием комплексного подхода оптимизации топологии, размеров и формы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) формулировка задачи оптимизации на каждом этапе проектирования судовых конструкций;
- 2) анализ существующих методов математического программирования, включая подходы параметрической оптимизации, топологической оптимизации и оптимизации формы;
- 3) разработка рекомендаций по решению оптимизационных задач, включая методы решения и способы учёта ограничений;
- 4) формулировка алгоритма рационального проектирования судовых конструкций;
- 5) разработка эффективных способов валидации полученного оптимального проектного решения;
- 6) анализ существующих критериев предельной и усталостной прочности, а также устойчивости и разработка рекомендаций по их учёту при решении оптимизационных задач;
- 7) апробация разработанного метода проектирования судовых конструкций на конкретных примерах.

### **Научная новизна**

Впервые разработан метод проектирования судовых конструкций, основанный на комплексном использовании трёх видов оптимизации: топологии, размеров и формы,

что позволяет проектировать рациональные конструкции, удовлетворяющие критериям как предельной, так и усталостной прочности, а также жёсткости, устойчивости и отстройке от резонансных частот.

Разработан новый метод расчёта многоциклового и малоциклового усталости судовых конструкций, содержащий алгоритмы, учитывающие трёхосность напряжённо-деформированного состояния в узлах, что повышает точность расчётных оценок.

Валидация полученного оптимального проектного решения на основе новых методов оценки статической и усталостной прочности, учитывающих усреднение напряжённо-деформированного состояния в пределах структурного элемента, что позволяет отказаться от проведения экспериментальной проверки.

### **Теоретическая значимость работы**

В методе последовательного квадратичного программирования предложено вместо линеаризации ограничений выполнять их квадратичные приближения с целью повышения вероятности нахождения глобального экстремума в оптимизационной задаче.

В ходе разработки рекомендаций по проверке предельной прочности предложен подход построения диаграммы истинных напряжений и деформаций на участке после образования шейки, а также выражения для определения предельной пластической деформации в деформационном критерии вязкого разрушения.

Предложена модификация модели усталостной прочности Басквина – Мэнсона – Коффина с коррекцией средних напряжений Смита – Уотсона – Топпера, основанная на усреднении напряжённо-деформированного состояния в пределах структурного элемента.

В расчётах усталостной прочности для методов абсолютных максимальных главных напряжений, знаковых касательных напряжений, знаковых эквивалентных напряжений и напряжений Синса получены выражения расчётных напряжений как при плоском напряжённом состоянии, так и в случае пропорционального нагружения. Для метода Синса предложена модификация, учитывающая знак октаэдрических касательных напряжений, а также определено значение коэффициента чувствительности к гидростатическим напряжениям, согласующее расчётные напряжения этого метода в случае простого напряжённого состояния.

### **Практическая значимость работы**

Разработан метод проектирования судовых конструкций с использованием комплексного подхода к оптимизации топологии, размеров и формы, позволяющий в короткие сроки создавать принципиально новые рациональные конструкции, отличающиеся от традиционных низкой материалоемкостью и высоким ресурсом, и стимулирующий разработку новых прорывных конструктивных решений. В рамках данного метода разработаны:

- алгоритм многоцелевой оптимизации, учитывающий различные способы нагружения конструкций;
- алгоритмы проверки предельной прочности, устойчивости и усталостной прочности, учитывающие трёхосность напряжённо-деформированного состояния и пластическое течение материала, что обуславливает более высокую точность получаемых оценок по сравнению с нормативными документами.

Разработаны новые конструктивные решения по узлу стыкового соединения алюминиевых панелей в составе корпуса высокоскоростного судна, отличающиеся от рекомендованного Правилами РМРС вдвое меньшей массой и в три раза большим ресурсом, и даны рекомендации по его оформлению, вошедшие в новую редакцию Правил.

Разработана принципиально новая запатентованная конструкция крышки люкового закрытия сухогрузного судна, отличающаяся от используемой на сухогрузе проекта RSD59 на 30 % меньшей массой и в пять раз большим ресурсом, и даны рекомендации по проектированию крышек.

Разработана оптимизированная конструкция перекрытия ледового пояса морской ледостойкой стационарной платформы, отличающаяся от прототипа на 60 % большей жёсткостью и почти вдвое большей несущей способностью при одинаковой массе, и выполнены её прочностные испытания, подтвердившие правильность принятых технических решений. На этой основе даны рекомендации по проектированию перекрытий в составе ледового пояса.

### **Методы исследования**

Численные расчёты задач теории упругости выполнены с использованием метода конечных элементов. Решение задач топологической оптимизации выполнено с применением метода твёрдого изотропного материала со штрафом (Solid Isotropic Material with Penalization) и метода установки уровня (Level Set). Решение задач параметрической оптимизации выполнено с применением метода последовательного квадратичного программирования (Non-Linear Programming by Quadratic Lagrangian) и адаптивного одноцелевого метода (Adaptive Single-Objective), являющегося сочетанием поверхности отклика кригинга (Kriging), основанной на планировании эксперимента методом оптимального заполнения пространства (Optimal Space Filling), с методом смешанно-целочисленного последовательного квадратичного программирования (Mixed-Integer Sequential Quadratic Programming). Решение задач оптимизации формы выполнено методом эволюции граничных конечноэлементных узлов и методом прямой параметризации границы конструкции. Численные расчёты проводились с использованием программного комплекса ANSYS Workbench. Экспериментальные исследования проведены на универсальной испытательной гидравлической машине МУГ-3000.

### **Положения, выносимые на защиту**

- 1) Метод проектирования судовых конструкций с использованием комплексного подхода к оптимизации топологии, размеров и формы.
- 2) Метод расчёта усталостной прочности, учитывающий трёхосность напряжённо-деформированного состояния в узлах и особенности проверки как многоциклового, так и малоциклового усталости.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов параметрической оптимизации, выполненной в программном комплексе ANSYS Workbench, подтверждена:

- аналитически на примере решения тестовой задачи минимизации массы свободно опертой балки, нагруженной равномерно распределённой поперечной нагрузкой;
- путём демонстрации совпадения расчётных и экспериментальных результатов на примере решения задачи максимизации несущей способности перекрытия ледового пояса морской ледостойкой стационарной платформы.

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на 7 всероссийских конференциях и 3 конференциях с международным участием.

В результате разработки принципиально новой конструкции крышки люкового закрытия сухогрузного судна был получен патент на изобретение «Крышка люкового закрытия сухогрузного судна» № 2724042 от 18.06.2020.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Первая глава** посвящена анализу современных подходов к конструированию и разработке метода проектирования судовых конструкций на основе комплексного подхода к оптимизации.

В первом параграфе выполнен обзор литературы, связанной с оптимизацией при проектировании различного рода конструкций, в рамках которого рассмотрены работы отечественных учёных и исследователей, использующих параметрическую, топологическую оптимизацию или оптимизацию формы. Проведенный обзор позволяет сделать вывод о перспективности использования топологической оптимизации при проектировании судовых конструкций. При этом под оптимизацией формы в обозреваемых работах подразумевается не локальное снижение концентрации напряжений, а поиск рациональной конструктивно-силовой схемы, что по сути является прямой задачей оптимизации топологии. Также рассмотренные публикации не содержат метода проектирования конструкций, полноценно использующего три вида оптимизации и учитывающего проверку как предельной прочности и устойчивости, так и много- и малоциклового усталости. Указанные обстоятельства обосновывают поставленные цели и задачи диссертации.

Во втором параграфе сформулированы задачи оптимизации на каждом этапе проектирования судовых конструкций. Сначала даётся общая формулировка задачи мате-

математического программирования и приводятся два метода её решения: метод множителей Лагранжа и метод штрафных функций. Для поиска глобального минимума рекомендовано использовать оптимизационные алгоритмы, основанные на планировании эксперимента и построении поверхности отклика. Также рассмотрен вопрос сведения многоцелевой оптимизации к одноцелевой, где чаще используется подход взвешенной суммы и реже – подход гёльдеровой нормы. Приведена связь фронта Парето с двумя указанными подходами.

Далее сформулирована связанная с этапом определения прочных размеров конструктивных элементов задача параметрической оптимизации (ПО), в которой традиционной целевой функцией является полная масса  $M$  проектируемой конструкции и выполняется её минимизация:

$$M(\{x\}) = \{1\}^T \{m\}(\{x\}) \rightarrow \min_{\{x_{min}\} \leq \{x\} \leq \{x_{max}\}} \quad (1)$$

при ограничениях соответственно по прочности, жёсткости и устойчивости

$$\{\sigma\}(\{x\}) \leq \sigma_{max}, \quad (2)$$

$$\{u\}(\{x\}) \leq u_{max}, \quad (3)$$

$$\{\lambda_{min}\}(\{x\}) \geq 1, 2 \dots 1, 3, \quad (4)$$

где  $\{x\}$  – вектор параметров, характеризующих проектируемую конструкцию;  $\{\sigma\}$  и  $\{u\}$  – соответственно векторы напряжений и перемещений для всех расчётных случаев, составленные из максимальных значений;  $\sigma_{max}$  и  $u_{max}$  – допускаемое напряжение и перемещение соответственно;  $\{\lambda_{min}\}$  – вектор наименьших коэффициентов запаса при расчёте линейной устойчивости для всех расчётных случаев. Возможно наличие других ограничений помимо (2)–(4), например, на собственные частоты конструкции. Проанализированы подходы математического программирования, начиная от задач линейного и выпуклого программирования и заканчивая задачами нелинейного программирования, к которым в общем случае принадлежит задача (1)–(4). Для решения нелинейных задач использован подход последовательного квадратичного программирования, в частности, метод Non-Linear Programming by Quadratic Lagrangian (NLPQL), основанный на итерационном методе Ньютона с квадратичным приближением целевой функции и линеаризацией ограничений. Для метода NLPQL приведены основные формулы и выведены итерационные соотношения. Поскольку в задачах оптимизации судовых конструкций ограничения (2)–(4) зачастую являются высоко нелинейными, предложена модификация метода NLPQL, в которой вместо линеаризации ограничений выполняются их квадратичные приближения с целью повышения вероятности нахождения глобального экстремума.

Затем сформулирована связанная с этапом определения конструктивно-силовой схемы изделия задача топологической оптимизации (ТО), в которой традиционной целевой функцией является потенциальная энергия деформации  $S$  проектируемой кон-

струкции, для линейной задачи равная работе внешних сил, и выполняется её минимизация:

$$C(\vartheta) = \{F\}^T \{u(\vartheta)\} = \{F\}^T [K(\vartheta)]^{-1} \{F\} \rightarrow \min_{\vartheta \in \Theta} \quad (5)$$

при ограничении на массу (или объём) материала

$$M_{min} \leq \int_{V(\vartheta)} \rho dV \leq M_{max} \quad (6)$$

и, возможно, ограничениях по напряжениям  $\sigma$ , перемещениям  $u$  и собственным частотам  $f$  соответственно:

$$\max_{r \in \vartheta} \sigma(r) \leq \sigma_{max}, \quad (7)$$

$$\max_{r \in \vartheta} u(r) \leq u_{max}, \quad (8)$$

$$f_{min} \leq f(\vartheta) \leq f_{max}, \quad (9)$$

где  $\{F\}$  – вектор внешних сил;  $[K]$  – матрица жёсткости конструкции;  $\vartheta$  – конфигурация материала из множества допустимых конфигураций  $\Theta$ ;  $\rho$  – плотность материала;  $M_{max}$  и  $M_{min}$  – соответственно наибольшая и наименьшая допускаемые массы материала;  $r$  – материальная точка, принадлежащая конфигурации  $\vartheta$ . Проанализированы подходы к решению задач ТО. Дана классификация методов ТО, среди которых рассмотрены Evolutionary Structural Optimization и Bi-directional Evolutionary Structural Optimization, Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) и Rational Approximation of Material Properties, Level Set (LS) и Phase Field. Указаны достоинства и недостатки перечисленных методов. Приведены основные формулы и выведены итерационные соотношения для метода критериев оптимальности и последовательного выпуклого программирования, используемых в рамках SIMP. Рассмотрены два варианта приложения к конструкции линейно независимых векторов нагрузок: раздельное и одновременное действие. В первом варианте каждой нагрузке соответствует отдельный расчётный случай, что приводит к формированию вектора потенциальных энергий деформации  $\{C\}$ , при этом задача ТО (5)–(9) становится многоцелевой и может быть сформулирована в виде минимизации взвешенной суммы. Во втором варианте потенциальная энергия деформации (5) представляется не просто в виде суммы энергий от действия каждой нагрузки в отдельности, а получает дополнительные слагаемые, отвечающие совместному действию этих нагрузок, что говорит об отсутствии эквивалентности двух рассматриваемых вариантов приложения внешних сил. Это привело к созданию показанного на рис. 1 алгоритма выполнения многоцелевой ТО.

Следом сформулирована связанная с этапом снижения уровня концентрации напряжений в конструкции задача оптимизации формы (ОФ), в качестве целевой функции которой предложено использовать максимальное эквивалентное напряжение  $\sigma_{max}^{eq}$  с выполнением его минимизации:

$$\sigma_{max}^{eq}(\{s\}) = \max_{e=1, \dots, N_{elem}} \sigma_e^{eq}(\{s\}) \rightarrow \min_{\{s_{min}\} \leq \{s\} \leq \{s_{max}\}} \quad (10)$$

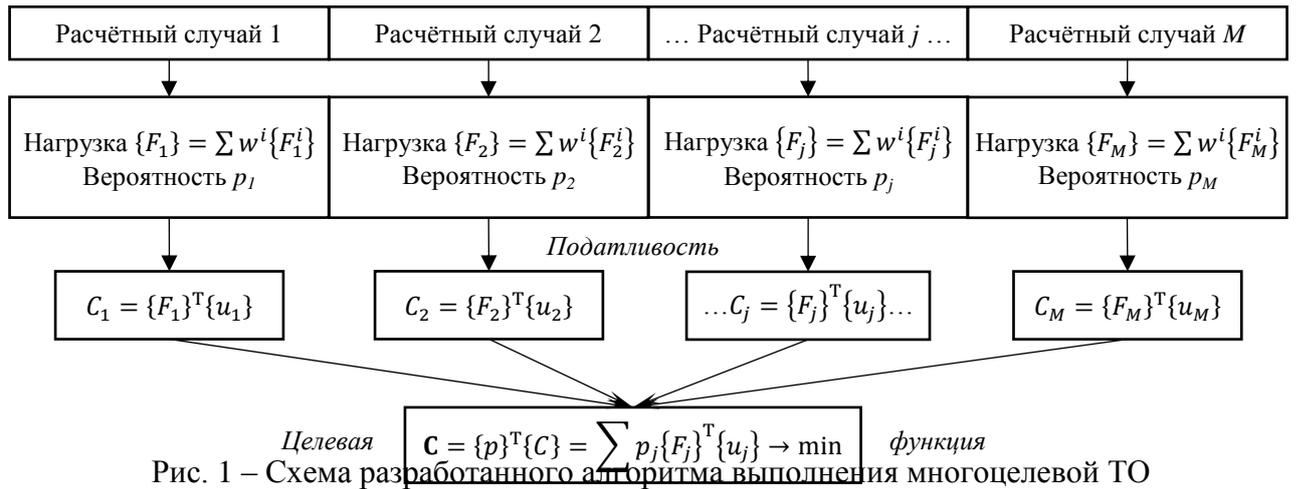


Рис. 1 – Схема разработанного алгоритма выполнения многоцелевой ТО

возможно при ограничении на массу (или объём) материала

$$\int_{V(\{s\})} \rho dV \leq M_{max} \quad (11)$$

и других технологических и геометрических ограничениях

$$\{g\}(\{s\}) \leq 0, \quad (12)$$

$$\{h\}(\{s\}) = 0, \quad (13)$$

где  $\{s\}$  – вектор переменных проектирования, описывающих границу конструкции. Проанализированы подходы к решению задач ОФ. Дана классификация методов ОФ, среди которых рассмотрены методы описания границы конструкции через конечноэлементные (КЭ) узлы, на ней лежащие, через интерполяционные многочлены, через кривые NURBS, а также метод неявной эволюции границы с помощью фиктивных сил. Указаны достоинства и недостатки перечисленных методов. Здесь, как и в задаче ТО, минимизация напряжений при одновременном действии двух или более линейно независимых векторов нагрузок не является эквивалентной многоцелевой минимизации взвешенной суммы напряжений при раздельном действии этих нагрузок. В этой связи для выполнения ОФ предлагается использовать алгоритм, аналогичный алгоритму выполнения ТО (рис. 1), с той лишь разницей, что потенциальные энергии деформации  $C_j$  заменяются на максимальные эквивалентные напряжения  $(\sigma_{max}^{eq})_j$ , а целевая функция приобретает вид

$$\sigma_{\Sigma} = \{p\}^T \{\sigma_{max}^{eq}\} \rightarrow \min. \quad (14)$$

В третьем параграфе выполнена разработка метода проектирования с использованием комплексного подхода к оптимизации топологии, размеров и формы и сформулированы основные этапы алгоритма рационального проектирования судовых конструкций, входящего в состав разработанного метода. Проектирование представляет собой многостадийный процесс. Он начинается с поиска конструктивно-силовой схемы, отвечающей функциональному и техническому назначению изделия. Далее возникает вопрос определения толщин и размеров связей, удовлетворяющих критериям прочности,

жёсткости и устойчивости. На последней стадии процесса формируется конструктивно-технологический облик узлов, позволяющий обеспечить заданный ресурс конструкции вкпе с разумным уровнем стоимости её изготовления. Для каждой стадии процесса проектирования предложено использовать свои методы оптимизации: на стадии выбора конструктивно-силовой схемы целесообразно применять приёмы ТО, на стадии выбора толщин и размеров силовых элементов – приёмы ПО, а на стадии конструктивно-технологического оформления узлов – приёмы ОФ. Схема алгоритма рационального проектирования судовых конструкций, состоящего из нескольких этапов, показана на рис. 2.

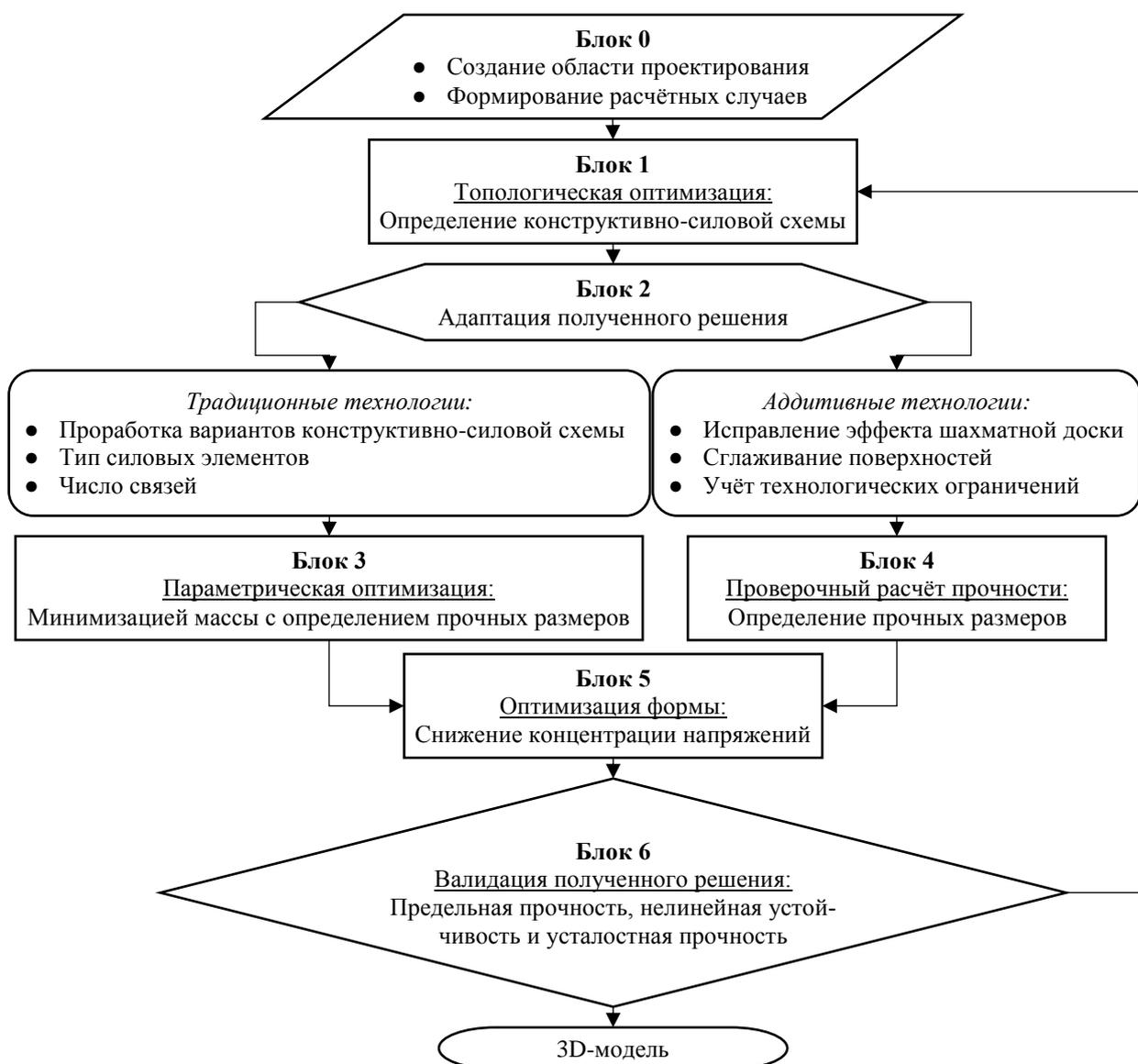


Рис. 2 – Схема предлагаемого алгоритма рационального проектирования судовых конструкций

На начальном этапе (блок 0) создаётся область проектирования, в которую должна быть вписана разрабатываемая конструкция. Если заранее известны и фиксированы части конструкции, на которые действуют внешние силы, а также части конструкции, которые должны быть закреплены, то задание нагрузок и граничных условий является вполне очевидным. Но зачастую это не так, и конкретная поверхность, линия или точка

приложения нагрузки не фиксирована, хотя эта нагрузка сохраняет главный вектор и главный момент. В таком случае необходимо рассматривать набор различных вариантов конкретного приложения внешних сил.

На следующем этапе (блок 1) решается задача ТО в постановке (5)–(9) (хотя она может быть сформулирована и в двойственной постановке), где для многоцелевой ТО используется описанный ранее алгоритм (рис. 1). В ходе ТО происходит поиск оптимальной структуры и эффективного распределения материала, что позволяет выявить рациональную конструктивно-силовую схему. Для решения задачи ТО рекомендуется использовать несколько методов, например, SIMP и LS – они дают, как правило, близкие, но не идентичные решения. Полученные двумя методами решения необходимо сопоставить путём проведения проверочных расчётов прочности. При использовании метода SIMP рекомендуется применять подход увеличения штрафного параметра, начиная с единичного и заканчивая его значением не менее 3,0. Также целесообразно решение последовательности задач ТО с постепенным убыванием остаточной массы материала (подход уменьшения остаточной массы).

Конструкции, получаемые в результате ТО, зачастую имеют весьма причудливые формы и требуют адаптации под существующие технологии (блок 2). Воспроизведению таких структур в конструкциях судов в наибольшей мере способствуют лишь аддитивные технологии, которые являются довольно дорогостоящими и на данный момент нашли очень ограниченное распространение в судостроении. Но даже с их применением требуется постобработка полученной геометрии в системах автоматизированного проектирования. В случае применения традиционных для судостроения технологий требуется на основе комплексной структуры, полученной в результате решения задачи ТО, сформировать относительно простую конструктивно-силовую схему, определяемую типом силовых элементов, их числом, расположением в пространстве и способами соединения между собой.

Сформированная после адаптации конструкция нуждается в проведении проверочных расчётов прочности и устойчивости, вне зависимости от того была ли она адаптирована под традиционные (блок 3) или аддитивные (блок 4) технологии. При этом в расчётах прочности выполняется оценка номинальных напряжений в конструкции, а величина напряжений в концентраторах игнорируется. Данный этап подразумевает проведение ПО в постановке (1)–(4). Существенное отличие между традиционной и аддитивной конструкциями заключается в том, что первая параметризуется гораздо проще второй. Поэтому в случае аддитивной конструкции ПО не всегда возможна, а вместо неё выполняется итерационный процесс проведения проверочных прочностных расчётов с одновременным подбором размеров конструктивных элементов, выполняемым проектантом, а в некоторых случаях необходимо повторно провести ТО с ослаблением ограничения

на массу материала.

Следующим шагом является снижение концентрации напряжений в конструкции путём выполнения ОФ (блок 5), которая позволяет выполнить плавный переход от одной связи к другой (сгладить концентратор), что способствует увеличению ресурса конструкции. Задача ОФ формулируется в виде (10)–(13), при этом многоцелевая ОФ выполняется согласно описанному ранее алгоритму (рис. 1) с учётом (14). Поскольку в случае традиционной конструкции выполнение ОФ характерно для узлов пересечения связей, здесь рекомендуется использовать метод подмоделирования. В случае же аддитивной конструкции отделить связь от узла не всегда возможно, поэтому рекомендуется выполнять оптимизацию формы для всей конструкции целиком или для её больших частей в отдельности, что может помочь проектанту с назначением прочных размеров.

Поскольку при выполнении оптимизации задачи решаются в линейной постановке и используются упрощённые критерии прочности на основе допускаемых напряжений и перемещений, на завершающем этапе проектирования (блок 6) требуется валидация полученного оптимального решения, включающая проверку предельной прочности и нелинейной устойчивости, а также оценку ресурса конструкции. Т.к. процесс нагружения судовых конструкций зачастую имеет сложный характер, для повышения точности расчётов требуется учитывать трёхосность напряжённо-деформированного состояния (НДС).

**Вторая глава** посвящена разработке эффективных способов валидации полученного оптимального проектного решения, заменяющих экспериментальные исследования.

В первом параграфе выполнен анализ существующих критериев предельной прочности и даны рекомендации по их учёту при решении оптимизационных задач. Сначала сформулирована задача теории упругости и даны основные соотношения метода конечных элементов (МКЭ), как наиболее распространённого метода решения этой задачи. Приведён переход от инженерных деформаций и напряжений к истинными для стандартного образца при растяжении. Произведён краткий анализ существующих теорий прочности и даны рекомендации по их применению.

Следом выполнен анализ современных моделей пластического упрочнения, включающих модели линейного, кусочно-линейной и нелинейного изотропного и кинематического упрочнений. Приведены соотношения для вычисления накопленной пластической деформации.

Затем дана классификация критериев разрушения, включающая силовые критерии хрупкого разрушения и деформационные критерии вязкого разрушения. Для стандартного образца при растяжении предложен подход линейного продолжения диаграммы истинных напряжений и деформаций на участке после образования шейки, что позволи-

ло получить выражения для предельной пластической деформации в деформационном критерии вязкого разрушения.

Разработан алгоритм проверки предельной прочности, основанный на МКЭ. В зонах появления пластических деформаций рекомендовано использовать размер КЭ, соответствующий размеру  $d$  структурного элемента. Поскольку пластические деформации чаще всего затрагивают ограниченную область конструкции, в расчётах предельной прочности рекомендовано применять метод подмоделирования. Даны рекомендации по использованию моделей пластического упрочнения, где для линейных моделей предложена формула вычисления касательного модуля. В ходе решения выполняется проверка критериев как хрупкого, так и вязкого разрушения. При выполнении оптимизационных расчётов с целью их ускорения рекомендовано пользоваться упрощёнными критериями на основе допускаемых напряжений и допускаемых перемещений по типу (2), (3) или (7), (8).

Во втором параграфе выполнен анализ существующих критериев устойчивости и даны рекомендации по их учёту при решении оптимизационных задач. Сначала приведены основные соотношения из МКЭ для нахождения эйлеровой нагрузки и формы потери устойчивости при решении линейной задачи. Далее рассмотрены различные аспекты нелинейной устойчивости. Разработан основанный на МКЭ алгоритм проверки устойчивости, где на первом этапе выполняется расчёт линейной устойчивости, форма потери которой на втором этапе передаётся в качестве начальной погиби конструкции с последующим расчётом нелинейной устойчивости, для которого даны рекомендации по выбору шага приращения нагрузки и по определению критической нагрузки потери устойчивости. При решении оптимизационных задач с целью ускорения расчётов предложено использовать ограничение (4) на коэффициент запаса по линейной устойчивости.

В третьем параграфе выполнен анализ существующих критериев усталостной прочности. Сначала дана классификация моделей усталостной прочности, включающая силовые модели, деформационные модели и модели критической плоскости. Приведены способы учёта средних в цикле напряжений. Для деформационной модели Басквина – Мэнсона – Коффина с коррекцией Смита – Уотсона – Топпера предложена модификация, учитывающая усреднённые в пределах структурного элемента значения максимальных за цикл главных напряжений  $\bar{\sigma}_1^{max}$  и амплитуды полной главной деформации  $\bar{\varepsilon}_1^a$ :

$$\bar{\sigma}_1^{max} \bar{\varepsilon}_1^a = \frac{\sigma_f'^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \varepsilon_f' (2N_f)^{b+c}. \quad (15)$$

Далее проанализированы наиболее распространённые методы сведения сложного напряжённого состояния к простому при расчётах усталостной прочности: метод абсолютных максимальных главных напряжений, метод знаковых касательных напряжений,

метод знаковых эквивалентных напряжений, методы Синса и Кроссленда, а также метод критической плоскости. Даны рекомендации по использованию рассмотренных методов. Показано, что для металлических материалов в качестве знака расчётных напряжений предпочтительнее использовать знак абсолютных максимальных главных напряжений. Для всех рассмотренных методов, кроме метода критической плоскости, получены выражения расчётных напряжений через первое главное напряжение и коэффициент двуосности при плоском напряжённом состоянии. Также для рассмотренных методов получены выражения расчётных напряжений в случае пропорционального нагружения, которые для всех них, кроме метода Синса, оказались равными произведению коэффициента пропорциональности на константу метода С целью гармонизации метода Синса с остальными предложена модификация, учитывающая знак октаэдрических касательных напряжений:

$$\sigma_{Sines}^{sign}(t) = \text{sgn}(\sigma_{abs}(t)) \sqrt{\frac{1}{2} \mathbf{s}(t) : \mathbf{s}(t) + \beta \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}(t))}, \quad (16)$$

где  $\sigma_{abs}$  – абсолютное максимальное главное напряжение;  $\mathbf{s}$  – тензор-девиатор;  $\boldsymbol{\sigma}$  – тензор напряжений;  $\beta$  – коэффициент чувствительности к гидростатическим напряжениям.

Разработан метод расчёта усталостной прочности, учитывающий особенности проверки как многоциклового (см. рис. 3), так и малоциклового усталости (см. рис. 4). Поскольку образование пластических деформаций носит локальный характер, в упруго-пластических расчётах малоциклового усталости рекомендовано использовать метод подмоделирования. При решении оптимизационных задач в целях ускорения процесса вычислений рекомендовано использовать упрощённый подход к обеспечению ресурса, состоящий в ограничении коэффициента концентрации напряжений величиной 1,5...2.

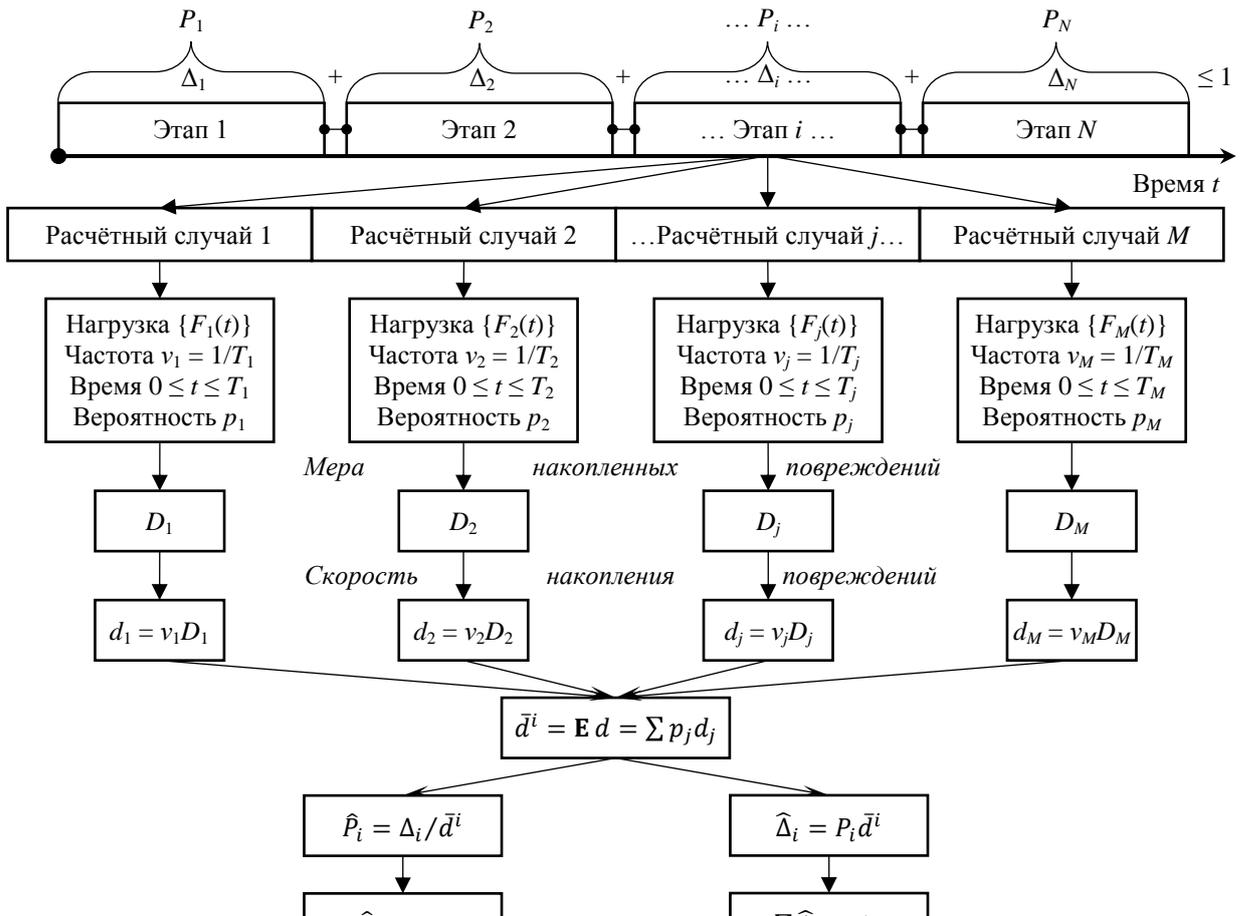


Рис. 3 – Схема разработанного алгоритма проверки многоциклового усталостной прочности

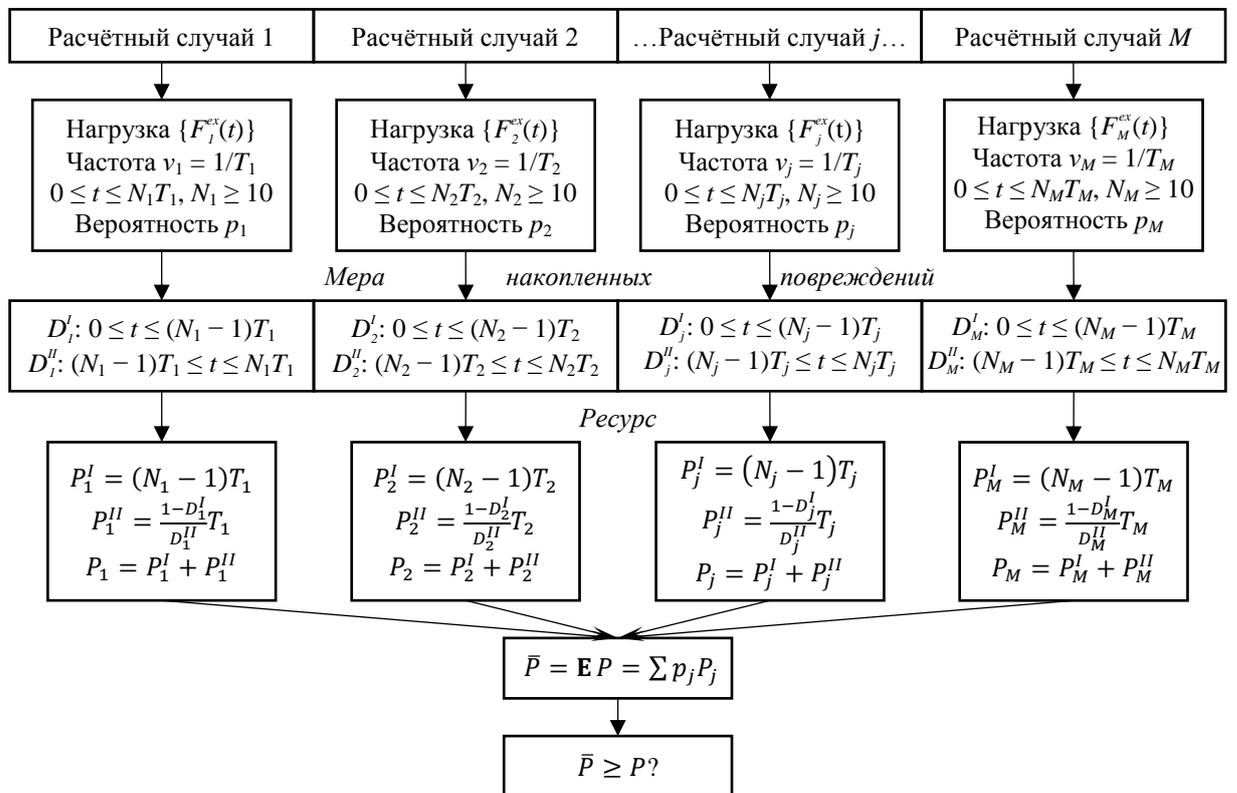


Рис. 4 – Схема разработанного алгоритма проверки малоциклового усталостной прочности

Третья глава посвящена апробации разработанного метода рационального проек-

тирования судовых конструкций.

В первом параграфе изложены результаты разработки узла стыкового соединения алюминиевых панелей в составе корпуса высокоскоростного судна. В результате последовательного выполнения ТО (рис. 6), ПО (рис. 5) и ОФ (рис. 7) удалось спроектировать подкрепляющий элемент, имеющий очень низкий коэффициент концентрации напряжений, что в три раза повышает ресурс стыкового соединения, при этом имея вдвое меньшую массу по сравнению с рекомендованным Правилами РМРС элементом (табл. 1).

Табл. 1 – Сопоставление рекомендованного Правилами РМРС и оптимизированного подкрепляющего элемента (снижение массы более чем в 2 раза и увеличение ресурса в 3 раза)

Подкрепляющий элемент	Коэффициент концентрации напряжений	Достижение пластической деформации 2 %		Критическая нагрузка		Масса
		при растяжении напряжением, МПа	при изгибе давлением, кПа	напряжение сжатия, МПа	наружное давление, кПа	
Отсутствует	1,33	242	119,5	76,5	109	0 %
Рекомендованный Правилами РМРС	3,44	210	114,0	75,0	123	100 %
Оптимизированный	1,05	246	136,0	75,0	124	42 %

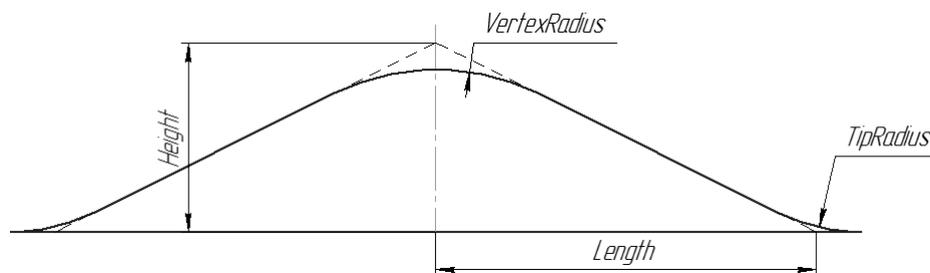


Рис. 5 – Параметризация листовой конструкции подкрепляющего элемента

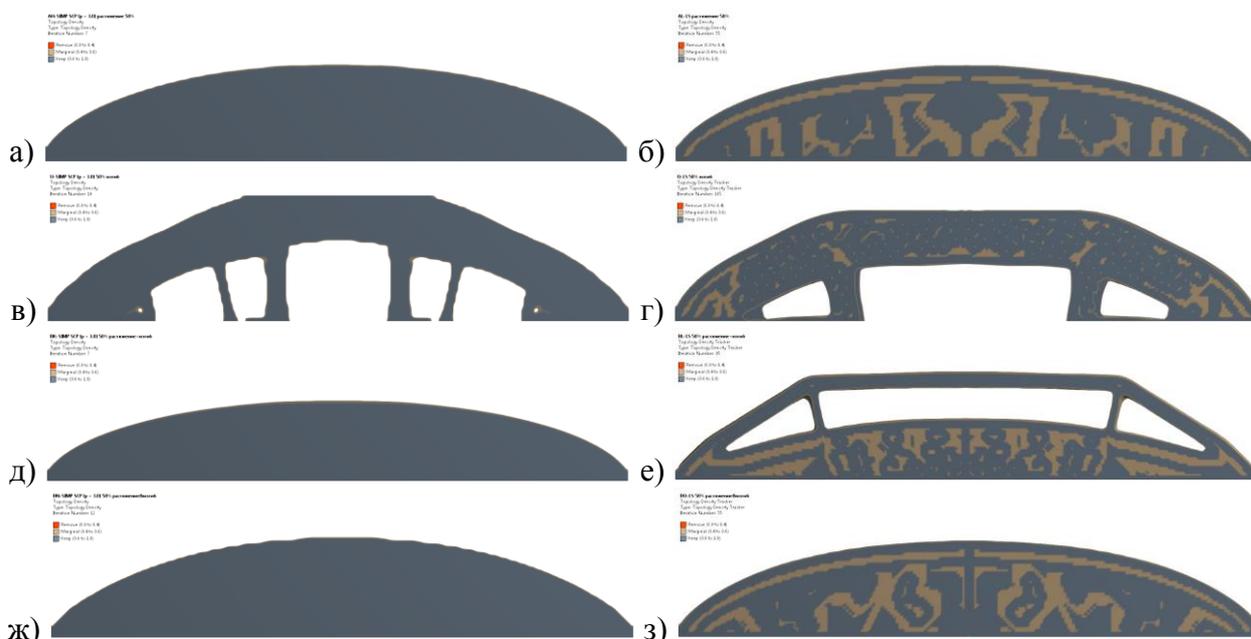


Рис. 6 – Результаты ТО листового подкрепляющего элемента при действии

- растягивающего напряжения 100 МПа: а) SIMP; б) LS;
- изгибающего давления 0,1 МПа: в) SIMP; г) LS
- растягивающего напряжения и изгибающего давления по отдельности: д) SIMP; е) LS
- растягивающего напряжения и изгибающего давления одновременно: ж) SIMP; з) LS

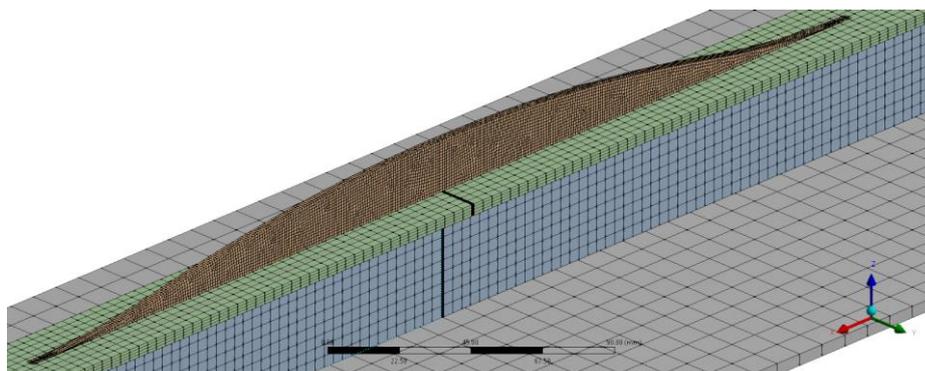


Рис. 7 – Листовой подкрепляющий элемент оптимальной формы при минимизации взвешенной суммы максимальных напряжений от двух расчётных случаев

Во втором параграфе изложены результаты разработки крышки люкового закрытия сухогрузного судна проекта RSD59. В результате последовательного выполнения ТО (рис. 8), ПО (рис. 9) и ОФ (рис. 10) удалось спроектировать алюминиевую крышку с более чем вдвое меньшей массой по сравнению со стальной (табл. 2).

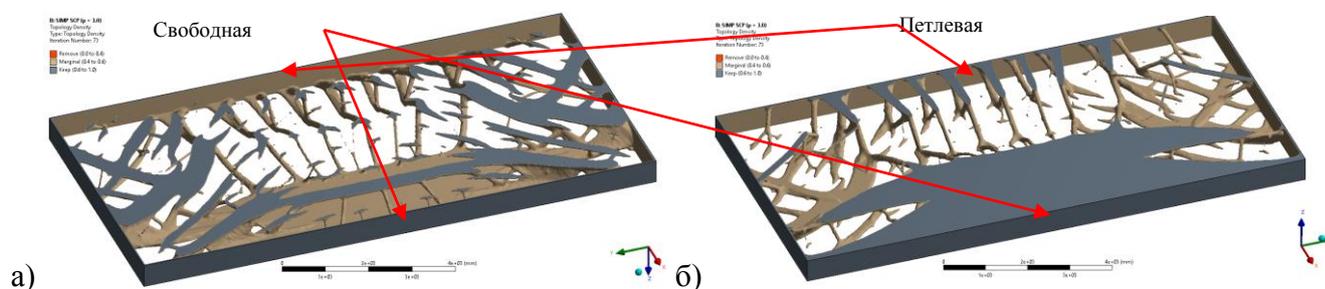


Рис. 8 – Результат ТО алюминиевой крышки люкового закрытия методом SIMP (настил не показан): а) вид сверху; б) вид снизу

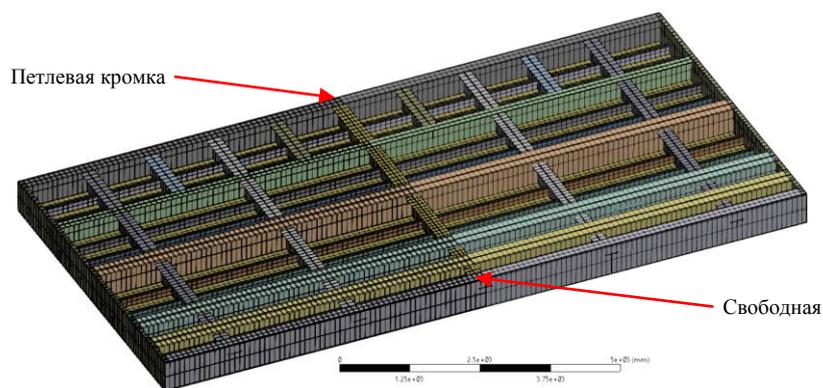


Рис. 9 – Балочная идеализация конструкции крышки люкового закрытия с интеркостельными связями в задаче ПО

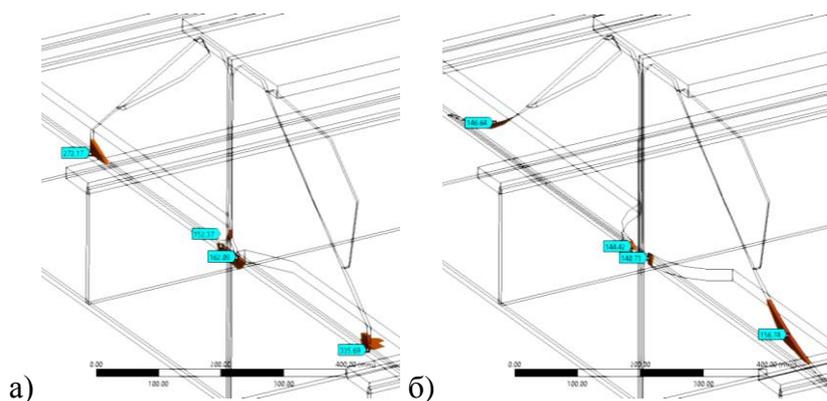


Рис. 10 – Локальная концентрация напряжений в алюминиевой конструкции крышки люкового закрытия: а) до ОФ; б) после ОФ

Табл. 2 – Сопоставление исходной и оптимизированной конструкций крышки люкового закрытия (за счёт оптимизации для стальной конструкции масса была сокращена на 30 %, а для алюминиевой – более чем на 50%)

Параметр	Исходная стальная крышка (РС D/D36)	Оптимизированная стальная крышка (РС D/D36)	Оптимизированная алюминиевая крышка (1561)
Масса, кг (с/без учёта кор. надбавки)	10 830/13 630 <sup>1</sup>	7 000/9 450	6 510
Максимальный прогиб, мм	50,4	35,0	64,3
Коэффициент концентрации напряжений $K_\sigma = \sigma_{\max}/\sigma_{\text{доп}}$	2,75	1,10	1,25
Коэффициент запаса по нагрузке $\lambda^{\text{н}}$	1,35	1,08	1,24

В третьем параграфе изложены результаты разработки оптимизированной конструкции перекрытия ледового пояса морской ледостойкой стационарной платформы. Поскольку топология ледового пояса задана платформой, минуя стадию ТО была сразу выполнена ПО (рис. 11), в результате которой удалось спроектировать перекрытие с почти вдвое большей несущей способностью и на 60 % увеличенной жёсткостью по сравнению с традиционным перекрытием (рис. 12).

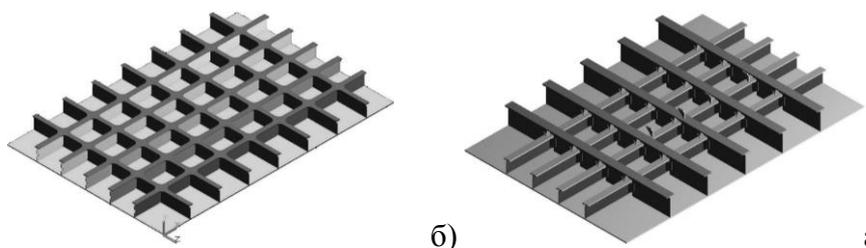


Рис. 11 – Конструкции перекрытия ледового пояса морской ледостойкой стационарной платформы: а) традиционная; б) оптимизированная

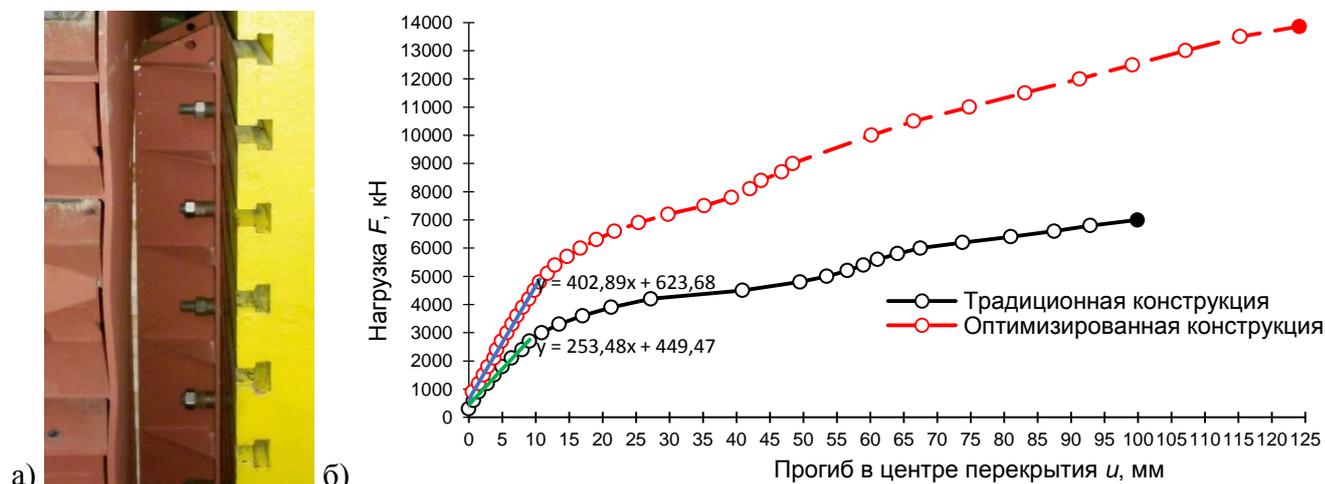


Рис. 12 – а) Экспериментальные исследования. б) Диаграммы деформирования традиционной и оптимизированной конструкций ледового пояса морской ледостойкой стационарной платформы (○ – промежуточные точки нагружения; ● – точки потери несущей способности). За счёт ПО несущая способность увеличена почти в 2 раза, а жёсткость – на 60%

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследований и разработок, выполненных в настоящей диссертации:

1. Разработан метод проектирования судовых конструкций с использованием комплексного подхода к оптимизации топологии, размеров и формы. Этот метод обеспечи-

вает системное решение трёх задач проектирования: определение конструктивно-силового оформления изделия за счёт выполнения ТО; определения прочных размеров конструкций путём выполнения ПО; обеспечения усталостной прочности с помощью выполнения ОФ. Отличительной чертой, составляющей научную новизну разработанного метода, является совместное выполнение трёх видов оптимизации.

2. Для каждого вида оптимизации сформулированы целевые функции и ограничения.

3. Проанализированы методы ПО, ТО и ОФ. Предложена модификация метода последовательного квадратичного программирования, в которой вместо линеаризации ограничений выполняется их квадратичное приближение.

4. Даны рекомендации по решению сформулированных оптимизационных задач, включая методы решения и способы учёта ограничений. Разработан алгоритм проведения многоцелевой оптимизации при наличии нескольких расчётных случаев нагружения. Продемонстрировано влияние сочетания линейно независимых нагрузок на получающиеся оптимальные конструкции.

5. Даны формулировки основных этапов алгоритма рационального проектирования судовых конструкций, входящего в состав разработанного метода проектирования и включающего процедуры оптимизации и валидации проектных решений.

6. Разработаны эффективные способы валидации полученного оптимального проектного решения, включающие в себя проверку предельной прочности, нелинейной устойчивости и усталостной прочности более точными методами по сравнению с имеющимися в нормативных документах, что позволяет отказаться от экспериментальной проверки.

7. Проанализированы существующие критерии предельной и усталостной прочности, а также устойчивости. Предложены формулы для определения истинных напряжений и деформаций на участке после образования шейки, а также выражения для касательного модуля в линейных моделях пластического упрочнения. Разработан алгоритм проверки предельной прочности на основе критериев хрупкого и вязкого разрушения. Разработан алгоритм проверки нелинейной устойчивости. Предложена модификация модели усталостной прочности Басквина – Мэнсона – Коффина с коррекцией средних напряжений Смита – Уотсона – Топпера, основанная на усреднении напряжённо-деформированного состояния в пределах структурного элемента. Проанализированы методы сведения сложного напряжённого состояния к простому в расчётах усталости и даны рекомендации по их использованию. Получены аналитические выражения расчётных напряжений при анализе усталостной прочности в случае плоского напряжённого состояния и в случае пропорционального нагружения, предложена знаковая модификация метода Синса. Разработан новый метод расчёта усталостной прочности, учитывающий трёхосность напряжённо-деформированного состояния в узлах и особенности проверки как много-

цикловой, так и малоцикловой усталости. Даны рекомендации по учёту при решении оптимизационных задач критериев предельной и усталостной прочности, а также устойчивости.

8. Выполнена апробация предложенного метода оптимального проектирования судовых конструкций и на его основе разработаны:

8.1. Узел стыкового соединения алюминиевых панелей в составе корпуса высокоскоростного судна, отличающийся от рекомендованного Правилами РМРС в 2 раза меньшей массой и в 3 раза большим ресурсом.

8.2. Запатентованная конструкция крышки люкового закрытия сухогрузного судна, отличающиеся от используемой на сухогрузе проекта RSD59 на 30 % меньшей массой и в 5 раз большим ресурсом.

8.3. Конструкция перекрытия ледового пояса морской ледостойкой стационарной платформы, отличающаяся от прототипа на 60 % большей жёсткостью и почти в 2 раза большей несущей способностью при одинаковой массе. Достоверность полученных результатов подтверждена сопоставлением расчётных и экспериментальных данных.

Учёт трёхосности НДС и пластического течения материала в разработанных методах и алгоритмах расчёта предельной прочности и устойчивости позволяет с высокой степенью точности определять несущую способность конструкций, а в разработанном методе расчёта усталости позволяет с высокой степенью точности прогнозировать ресурс конструкций. Конструкции, получаемые в результате использования разработанного метода оптимального проектирования, при малом весе имеют как высокую жёсткость и прочность, так и высокий ресурс, что благоприятным образом отражается на экономической эффективности содержащего их объекта морской техники.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

В изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

1) Кудрин М.А., Маслич Е.А., Платонов В.В., Филатов А.Р. Автоматизация расчётной проверки предельной и усталостной прочности корпусов навалочных и наливных судов на основе единых правил МАКО // Труды Крыловского государственного научного центра. 2014. № 82(366). С. 17–20.

2) Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Численное моделирование процессов упругопластического деформирования перекрытия ледового пояса морской ледостойкой платформы // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. № 86(370). С. 125–132.

3) Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Модель упругопластического деформирования алюминиевых сплавов и критерии малоцикловой усталости конструкций // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Спец. выпуск 2. С. 85–95.

4) Александров А.В., Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р., Рыбалко Т.Р. Расчетный анализ усталостной долговечности и скорости выработки ресурса на различных стадиях жизненного цикла СПБУ // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019.

Спец. выпуск 1. С. 137–145.

5) Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Учет многоосности нагружения узлов соединения конструкций морской техники при расчетах их усталостной прочности // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Спец. выпуск 1. С. 153–161.

6) Филатов А.Р. Различные способы учета трехосности напряженного состояния при расчетах усталостной прочности // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Спец. выпуск 2. С. 132–142.

7) Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 1(391). С. 95–108.

8) Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Конструктивное оформление узлов судовых конструкций с использованием программ топологической и параметрической оптимизации // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Спец. выпуск 1. С. 67–72.

В изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science Core Collection

9) Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Оптимизация алюминиевой крышки люкового закрытия сухогрузного судна // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 1-3(47). С. 58–65.

В других изданиях

10) Бухвалова В.В., Филатов А.Р. Геометрическое программирование и задачи проектирования // Образовательные технологии и общество. 2017. Т. 20. № 1. С. 508–518.

11) Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Analysis of stress-strain state specifics for compound wing with non-continuous members and elaboration of recommendations for its rational design // Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference «Navy and Shipbuilding Nowadays» (June 29 – 30, 2017, St. Petersburg, Russia). СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2017. С. 132–141.