

Научная статья
УДК 629.128
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/38-50>

Постановка и численное решение задачи оптимизации конструкций корпуса судна

Виктор Григорьевич Бугаев✉, Владислав Михайлович Кашаев,
Максим Владимирович Китаев

Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация
✉ bugaev.vg@dvfu.ru

Аннотация. В последнее время в России и за рубежом уделяют большое внимание цифровой экономике и предприятиям, ориентированным на внедрение концепции информационной поддержки жизненного цикла изделия, технологий управления жизненным циклом изделия и на численные методы решения проектных и технологических задач. Основное внимание в статье уделено моделированию изгибающих и скручивающих моментов, исследованию напряжённо-деформированного состояния корпуса судна как сложной пространственной конструкции переменного по длине сечения с учётом изгиба в горизонтальной и вертикальной плоскостях, стеснённого кручения корпуса, наличия двойного борта и двойного дна, продольных и поперечных переборок, вырезов люков. Приведены результаты определения элементов эквивалентного бруса и оптимизации конструкции корпуса на начальном этапе проектирования судна.

Ключевые слова: оптимизация, компьютерное моделирование, общая продольная прочность, кручение
Для цитирования: Бугаев В.Г., Кашаев В.М., Китаев М.В. Постановка и численное решение задачи оптимизации конструкций корпуса судна // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 38–50.

Original article

Formulation and numerical solution of the problem of optimization of ship hull structures

Viktor G. Bugaev✉, Vladislav M. Kashaev, Maksim V. Kitaev

Far Eastern Federal University,
Vladivostok, Russian Federation
✉ bugaev.vg@dvfu.ru

Abstract. Recently, Russia and abroad have been paying great attention to the digital economy and enterprises focused on the introduction of the concept of information support for the product life cycle, product life cycle management technologies and numerical methods for solving design and technological problems. The main attention in the article is paid to the modeling of bending and torsional moments, the study of the stress-strain state of the ship's hull as a complex spatial structure of variable section length, taking into account the bending in the horizontal and vertical planes, constrained torsion of the hull, the presence of a double side and a double bottom, longitudinal and transverse bulkheads, hatch cutouts. The results of determining the elements of an equivalent beam and optimizing the hull structure at the initial stage of ship design are presented.

Keywords: optimization, computer modeling, total longitudinal strength, torsion

For citation: Bugaev V.G., Kashaev V.M., Kitaev M.V. Formulation and numerical solution of the problem of optimization of ship hull structures. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 38–50. (In Russ.).

Введение

Внедрение цифровых технологий в судостроение предполагает наличие предприятий, оснащённых современным техническим и программным обеспечением, методическими материалами, описывающими технологию цифрового проектирования (3D-моделирования, инженерного анализа и технологической подготовки производства) судов и объектов морской техники, соответствующей нормативной базы. Особое место в этой цепочке занимают методы проектирования и сопровождения судов в течение их жизненного цикла.

В научной среде всё чаще рассматриваются проблемы и методы создания и использования цифровых двойников, отмечается их роль в управлении жизненным циклом изделий судостроения, необходимость совершенствования нормативно-правовой базы и требований соответствующих разделов правил классификационных обществ [1–3]. Отмечается, что методы, основанные на использовании данных судов-прототипов и статистических данных для новых объектов, оказываются мало применимы в связи с повышением требований к технологичности и, как следствие, снижением строительной стоимости судов, а также с появившейся возможностью использования типовых библиотек ранее созданных цифровых двойников, судового оборудования, комплектующих, элементов набора и других изделий [2–5].

При проектировании конструкций корпуса новых судов важным аспектом является моделирование нагрузок, действующих на корпус судна на волнении, а также оценка влияния отдельных элементов конструкций на прочность при общем продольном изгибе и кручении [3, 6–9]. Численные методы и цифровые технологии предоставляют широкие возможности для проведения исследований в этом направлении [4, 10, 11].

Рядом классификационных обществ разработаны и используются рекомендации для выполнения численного анализа мореходных качеств [8], общей продольной прочности [2] и мониторинга изменения технического состояния судовых конструкций с течением времени [1, 2, 11].

Цель исследования – численное решение задачи оптимизации конструкций корпуса судна с использованием информационных технологий проектирования и поддержки жизненного цикла.

Объект исследования – сухогрузное судно с широким раскрытием палубы.

Задача решается в два этапа:

Первый этап – определение элементов эквивалентного бруса (ЭБ) судна до оптимизации основных конструкций корпуса, набранных по Правилам Российского морского регистра судоходства (РМРС).

Второй этап – определение топологии и размеров связей конструкций корпуса X_k , при которых один из принятых критериев эффективности (материалоёмкость или себестоимость изготовления) достигает минимального значения и выполняются требования к конструкции, представленные в виде системы ограничений [4, 5, 12–14].

Известными величинами являются: характеристики и элементы судна, полученные на верхнем уровне проектирования, весовая нагрузка, параметры формы корпуса, компоновка; начальные параметры и элементы эквивалентного бруса (ЭБ) (площадь и момент инерции поперечного сечения, толщины верхней палубы, борта, днища, двойного дна и др.) (рис. 1b), форма и положение волновой ватерлинии и др. X^* (табл. 1) [12].

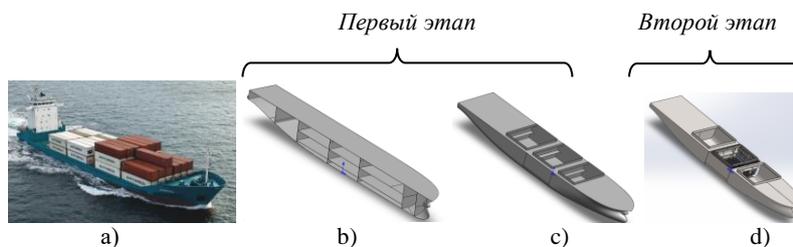


Рис. 1. Сухогрузное судно Холмогоры:
a) внешний вид судна; b) 3D-модель ЭБ без вырезов; c) 3D-модель ЭБ с вырезами;
d) 3D-модель ЭБ с конструкциями корпуса в районе центрального трюма

Fig. 1. Dry cargo vessel Kholmogory:
a) appearance of the vessel; b) 3D model of the EB without cutouts; c) 3D model of the EB with cutouts; d) 3D model of the EB with hull structures in the area of the central hold

На основании этих данных создана 3D-модель корпуса судна (рис. 1с), а затем детальная 3D-модель конструкций центрального трюма в соответствии с требованиями Правил РМРС, равноценная по моменту инерции эквивалентному брусу для второго этапа (рис. 1d).

Таблица 1/ Table 1

Исходная информация для моделирования
Background information for modeling

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Параметры	L, м	B, м	T, м	H, м	D, т	DW, т	v, уз	$P_{ко}(P_i), т$	$l_1(l_i), м$	$b_o, м$
2	Значения	60,0	15,5	4,0	6,0	2800	1830	16,0	710	12,8	13,65

Здесь и далее L – длина между перпендикулярами, B – ширина, T – осадка, H – высота борта, D – водоизмещение, DW – дедвейт, v – расчётная скорость; $P_{ко}(P_i)$ – масса основного корпуса (i-го раздела нагрузки: оборудования; устройств; систем и др.); $l_1(l_i)$ – длина центрального трюма (i-го отсека); b_o – ширина трюма (люка). Начальное отношение $H/B = 0,387$, $b_o/B = 0,88$.

Оптимизируемые переменные X_k :

Первый этап:

$s_1, s_2, s_3, s_4, \dots$ – толщины элементов эквивалентного бруса, верхней палубы (стрингера, угловых листов люков), борта (ширстрека), днища, двойного борта и двойного дна, поперечных переборок, комингсов люков, мм;

b_o, h_d – ширина люка (или двойного борта), высота двойного дна, м.

Второй этап:

a – шпация поперечного набора, мм;

n_1, n_2 – размеры бимсов и шпангоутов;

k_1, k_2 – количество усиленных продольных балок и поперечных рам набора, ед.;

s_1, s_2, s_3, s_4 – толщины палубной, бортовой и днищевой обшивок, толщина флоров, мм; топология (количество бортовых стрингеров и диафрагм).

Критерий эффективности:

Первый этап:

- минимум массы ЭБ

$$f_k(X^*, X_k) \rightarrow \min M(X^*, s, b_o, h_d), \tag{1}$$

Второй этап:

- минимум массы корпуса судна

$$f_k(X^*, X_k) \rightarrow \min M(X^*, a, n, k, s), \tag{2}$$

или

- минимум себестоимости изготовления конструкций корпуса

$$f_k(X^*, X_k) \rightarrow \min C_{пр}(X^*, a, n, k, s). \tag{3}$$

При определении размеров конструктивных элементов ЭБ и корпуса судна рассмотрен вариант загрузки при максимальной осадке. Балластное состояние и специальные случаи загрузки в настоящей работе не рассматриваются.

Ограничения определяют область допустимых решений и отражают требования Правил РМРС. Наряду с вектором оптимизируемых переменных и критерием эффективности они во многом определяют структуру и параметрические связи создаваемой 3D-модели.

3D-модель конструкций корпуса представляет собой совокупность трёхмерных моделей отдельных элементов и подсистем, объединённых параметрическими и ассоциативными взаимосвязями. В качестве подсистем в контексте сборки выступают палубное перекрытие (с вырезами и без вырезов), бортовое перекрытие (включая двойной борт), днищевое перекрытие, продольные и поперечные переборки. Любая подсистема может быть использована для

инженерного анализа – решения локальных задач с целью принятия решений о целесообразности внесения изменений в конструкции с учётом локальных нагрузок.

На первом этапе исследования создана судовая поверхность и элементы ЭБ (двойные борта и двойное дно, перемычки между люками) с целью увеличения крутильной жёсткости, испытывающие общий изгиб и кручение под действием сил веса и поддержания воды.

На втором этапе исследования в районе центрального трюма установлены конструкции корпуса, сохраняющие топологию эквивалентного бруса и параметры его поперечного сечения.

Таким образом, модель позволяет решать задачи стеснённого кручения корпуса судна переменного сечения и изгиба в горизонтальной и вертикальной плоскостях с учётом влияния на общую прочность двойного борта и дна, продольных и поперечных переборок, вырезов, комингсов и межлюковых перемычек.

Нагрузка. Изгибающие моменты и перерезывающие силы на тихой воде и на волнении моделируются посредством приложения весовой нагрузки (как для реально возможных в эксплуатации случаев распределения нагрузки) и сил поддержания к корпусу судна. Вес конструкций корпуса, устройств, энергетической установки, цистерн запаса СПГ и т.п., вошедших в 3D-модель, рассчитывается с учётом заданного материала и библиотечных элементов. Конструкции, оборудование и переменные грузы, не вошедшие в 3D-модель, моделируются в исследовании заданием сосредоточенных и распределённых сил в местах их расположения.

Нагрузка от запаса СПГ для газомоторных судов в случае оснащения их контейнер-цистернами можно считать сосредоточенной как для стандартного 40-фт контейнера (с учётом массы цистерны с запасом СПГ). Однако при установке танка СПГ в кормовой части судна нагрузка от него будет иметь более выраженное влияние на общую продольную прочность. Это влияние обуславливается сосредоточенным действием нагрузки и приложением её на малом расстоянии от транца в районе кормового подзора, зачастую выходящем из воды при статической постановке судна на волну, что необходимо также учесть в расчёте.

При постановке судна на косую волну создаются вертикальный, горизонтальный и скручивающий моменты. Величина усилий со стороны моря, действующих на корпус судна, зависит от формы корпуса, длины и ширины судна, от длины волны и курса судна относительно направления движения волн.

Наибольший изгибающий момент от общего кручения и наибольший изгибающий момент от общего продольного изгиба возникают при разных длинах волн. В то же время напряжения, вызываемые крутящим моментом, суммируются с напряжениями от общего продольного изгиба в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Этот факт необходимо учитывать при задании нагрузки, действующей на корпус судна, и выполнении расчётов по обеспечению прочности при кручении и общем изгибе.

Принято считать, что в момент времени, когда крутящий момент достигает максимальной величины, крен и качка судна отсутствуют, а усилиями, которые вызываются бортовой качкой, можно пренебречь.

Изгибающие моменты на вершине волны значительно превышают таковые на подошве волны, поскольку на подошве волны силы поддержания распределены более равномерно по длине судна, поэтому в настоящей работе особое внимание уделено исследованию прочности корпуса судна на вершине волны и при постановке на косую волну (рис. 2).

На нерегулярном волнении кручение и общий изгиб корпуса имеют сложный характер, требуют приложения хаотично изменяющихся во времени сил поддержания и поиск момента, когда напряжения в конструкциях будут максимальны, что в настоящее время трудно реализуемо. Наиболее опасным с точки зрения кручения корпуса является плавание судна на регулярном волнении при его движении под углом к направлению действия волн.

Крепление модели осуществлялось фиксированными шарнирами на сферических или цилиндрических гранях в зависимости от формы изгиба [12].

Сетка переменных размеров, строилась с учётом кривизны обводов и в зависимости от размеров деталей и типа исследования.

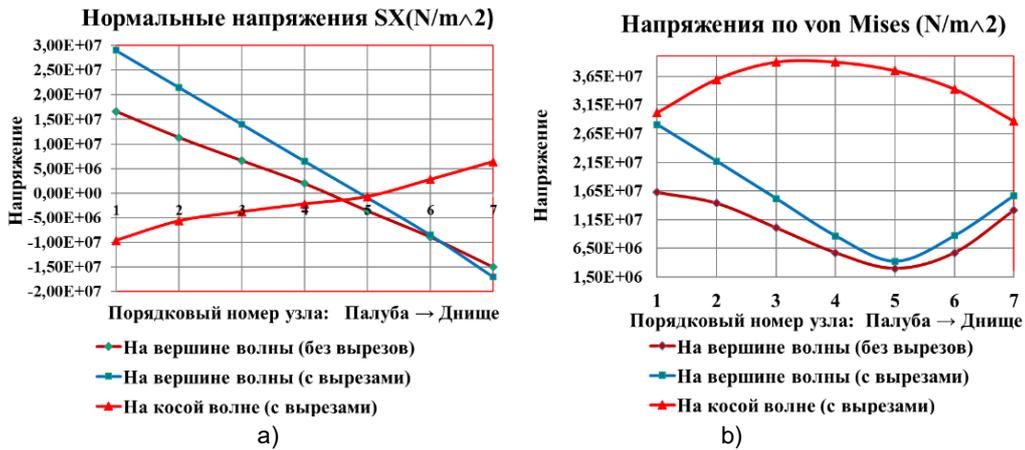


Рис. 4. Напряжения в обшивке бортового перекрытия: а) нормальные напряжения SX; б) напряжения von Mises

Fig. 4. Stresses in the hull lining:
a) normal stresses SX; b) stresses von Mises

На рис. 5, 6 приведены зависимости нормальных напряжений SX (рис. 5) и напряжений по Мизесу (von Mises) (рис. 6) на косой волне в обшивке палубного перекрытия по ширине судна в районе поперечной переборки, поперечного комингса люка и в середине выреза, а на рис. 7 – по длине судна в районе соединения палубы со вторым бортом.

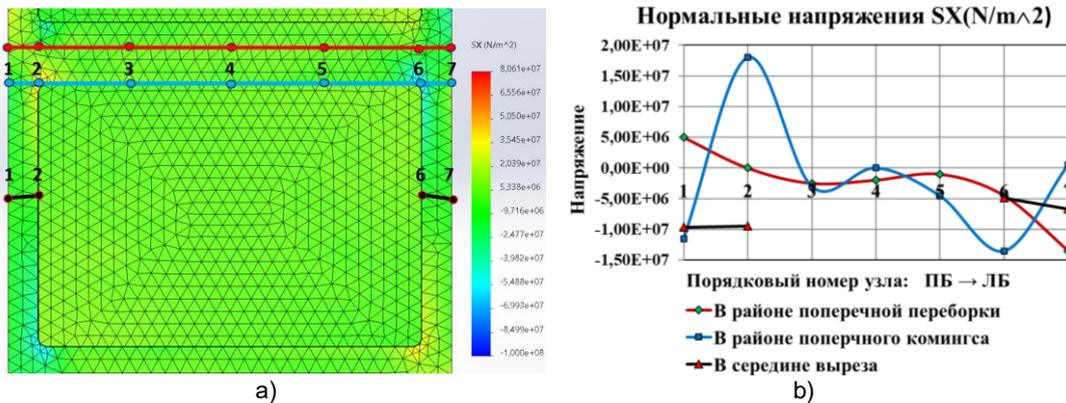


Рис. 5. Нормальные напряжения SX в обшивке палубного перекрытия на косой волне: а) эпюра напряжений; б) распределение напряжений

Fig. 5. Normal SX stresses in the deck floor skin on an oblique wave:
a) stress diagram; b) stress distribution

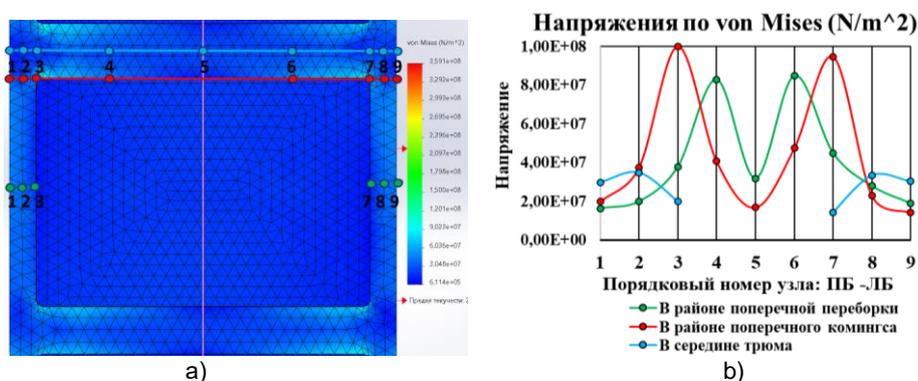


Рис. 6. Напряжения по Мизесу в обшивке палубного перекрытия на косой волне: а) эпюра напряжений; б) распределение напряжений

Fig. 6. Mises stresses in the plating of the deck floor on an oblique wave:
a) stress diagram; b) stress distribution

Наибольшие нормальные напряжения SX (рис. 5b) в обшивке палубного перекрытия в районе поперечного комингса на косой волне изменяются от -12,5 МПа у борта до +18,5 МПа в углу люка (узлы 1 и 2), средняя часть палубы менее загружена (узлы 3, 4, 5), левый борт загружен аналогично правому, но с противоположным знаком – от -14,0 МПа в углу люка до +0,5 МПа у борта (узлы 6 и 7). При этом палуба в средней части корпуса судна с точки зрения теории Мизеса (напряжения по Мизесу) загружена практически симметрично относительно ДП (рис. 6b).

Предлагаемый подход и 3D-модель конструкций корпуса (ЭБ) позволяет установить влияние элементов ЭБ, степени раскрытия палубы, длины трюма, ширины и высоты борта судна на величину наибольших напряжений и перемещений в различных районах корпуса, что расширяет преимущества оптимизации и детального анализа результатов исследований.

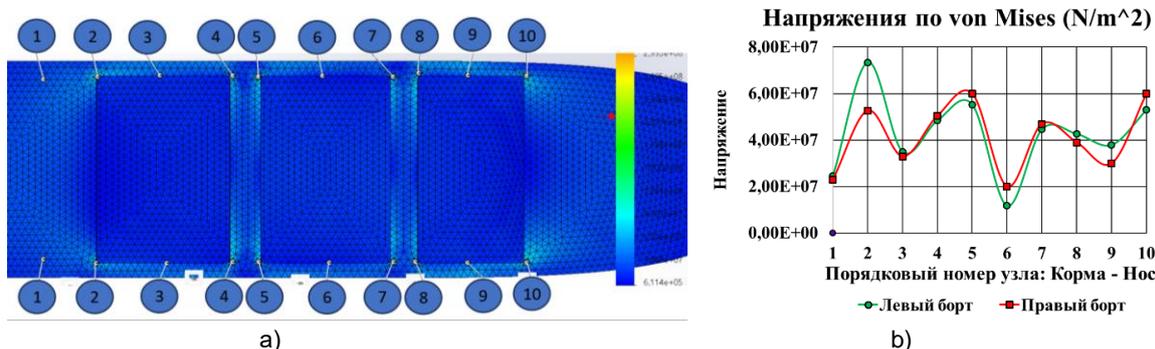


Рис. 7. Напряжения по Мизесу в обшивке палубного перекрытия на косой волне ($bo/B=0,88$): а) эпюра напряжений; б) распределение напряжений в районе борта

Fig. 7. Mises stresses in the plating of the deck floor on an oblique wave ($bo/B=0,88$): a) diagram of stresses on the grid; b) distribution of stresses in the area of the board

Для примера, на рис. 8 приведена зависимость напряжений по Мизесу в обшивке ЭБ от степени раскрытия палубы (ширины двойного борта) ($bo/B=0,88; 0,75; 0,65$), на рис. 8а – по контуру обшивки (палуба – борт – днище) в середине центрального трюма, на рис. 8б – по длине судна в районе продольного комингса правого борта. Заметно влияние степени раскрытия палубы на НДС в районе палубы и верхней части борта и менее заметно в районе днища, что говорит о необходимости обратить внимание, с одной стороны, на обеспечение равной прочности конструкций палубы и днища, а с другой стороны, на изменение нагрузки и, соответственно, сил поддержания (положение волны по отношению к корпусу судна).

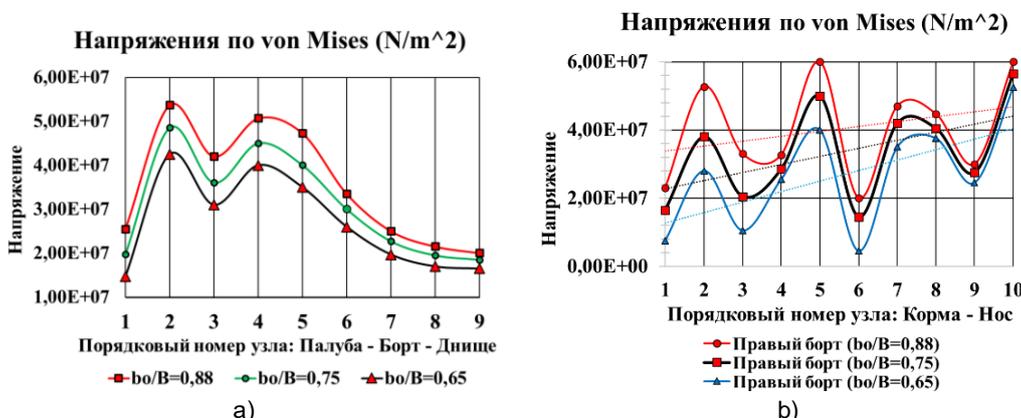


Рис. 8. Зависимость напряжений по Мизесу от степени раскрытия палубы (bo/B): а) по контуру обшивки (палуба – борт – днище) в середине центрального трюма; б) по длине судна в районе продольного комингса

Fig. 8. Dependence of Mises stresses on the degree of deck opening (bo/B): a) along the contour of the plating (deck – side – bottom) in the middle of the central hold; b) along the length of the vessel in the area of the longitudinal coaming

Оптимизация ЭБ. Задача оптимизации решается по критерию минимума массы (1) для судна с раскрытием палубы $b_0/V=0,75$. В качестве ограничений приняты напряжения по Мизесу в пределах 50–100 МПа во всех элементах ЭБ для получения равнопрочной конструкции.

Для определения элементов ЭБ в наиболее напряжённых его участках установлены датчики напряжений и перемещений, позволяющие контролировать напряжённо-деформированное состояние в этих районах. На рисунке 9 приведена предлагаемая схема расположения датчиков и начальные значения напряжений по Мизесу в районе расположения датчиков до оптимизации. В процессе выполнения расчётов датчики можно включить/отключить или установить новые в зависимости от их необходимости.

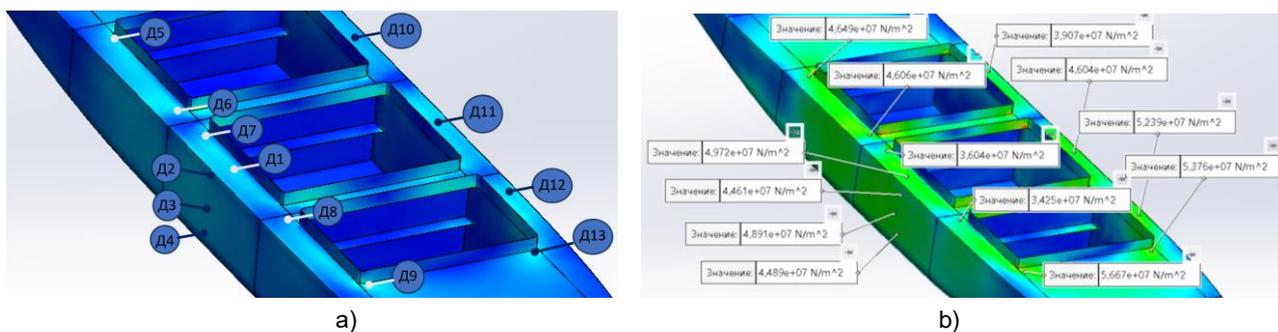


Рис. 9. Схема расположения датчиков:

а) предлагаемая схема; б) начальные значения напряжений до оптимизации ($b_0/V=0,75$)

Fig. 9. Sensor layout: a) the proposed scheme; b) initial values of stresses before optimization ($b_0/V=0,75$)

На рис. 10а приведены эпюра напряжений и расположение узлов, в которых определены напряжения, а также график распределения напряжений по контуру отсека (палуба, борт, скула, днище) до и после оптимизации.

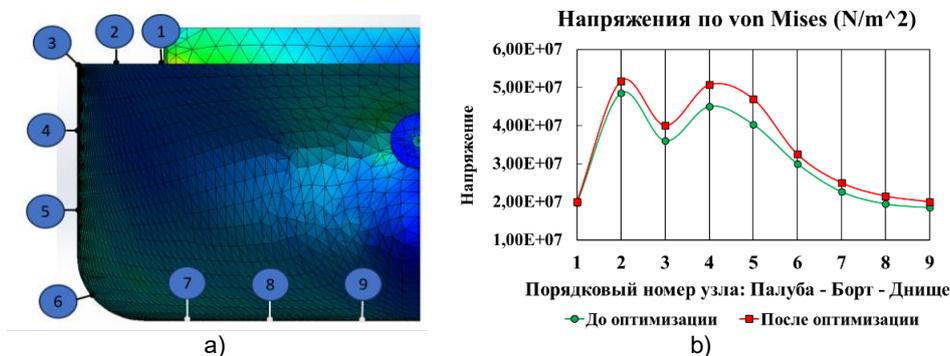


Рис. 10. Результаты оптимизации корпуса судна (ЭБ) ($b_0/V=0,75$):

а) эпюра напряжений по Мизесу в обшивке на косой волне; б) график распределения напряжений в обшивке палубы, борта, скулы и днища до и после оптимизации

Fig. 10. Results of hull optimization (EB) ($b_0/V=0,75$):

a) diagram of stresses according to Mises in the skin on an oblique wave; b) a graph of stress distribution in the deck, side, bilge and bottom plating before and after optimization

Поскольку наиболее напряжённым местом при любом виде изгиба корпуса судна является район угла выреза люка, а величина напряжений зависит от относительных размеров судна и люков (H/V , b_0/V), ширины поперечной перемычки, наличия и размеров двойного борта и двойного дна, в 3D-модель конструкций корпуса дополнительно введены угловые листы люков, двойной борт и двойное дно различной топологии.

На рис. 12 приведены 3D-модели ЭБ и конструкций корпуса в районе центрального трюма и таблица характеристик поперечного сечения корпуса. Возможные варианты конструктивных решений двойного борта представлены на рис. 13, аналогичные решения предусмотрены и для двойного дна.

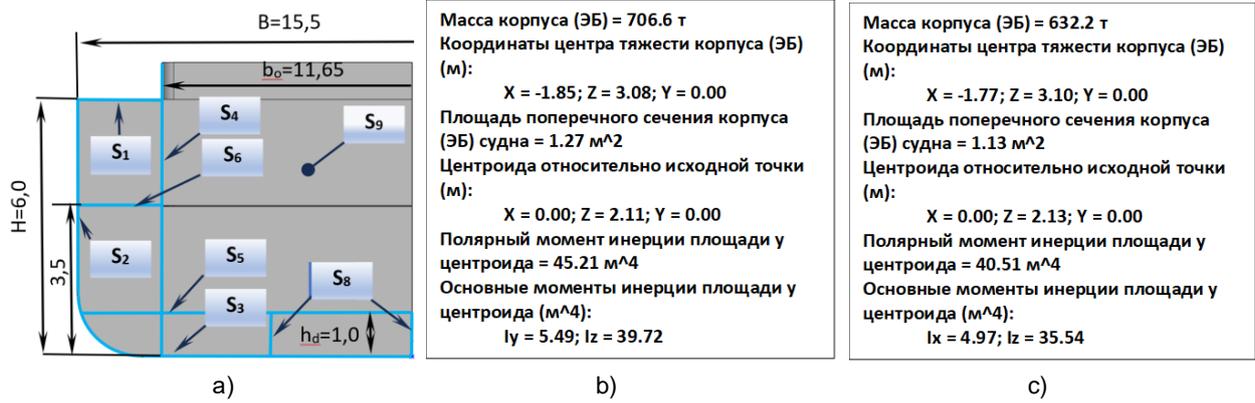


Рис. 11. Характеристики эквивалентного бруса:
а) основные элементы в районе центрального трюма; б) масса и характеристики поперечного сечения ЭБ до оптимизации; в) после оптимизации

Fig. 11. Characteristics of an equivalent beam:
 a) main elements in the area of the central hold; b) the mass and cross-sectional characteristics of the EB before optimization; c) after optimization

Масса отсека центрального трюма от переборки до переборки (рис. 12а) после оптимизации ЭБ составляет 157,4 т, масса начального варианта (до оптимизации) реальных конструкций центрального трюма (рис. 12б), набранных по Правилам РМРС, – 160,77 т, а характеристики поперечного сечения (рис. 12с): $z_g=2,19$ м; $x_s=1,77$ м; $I_y=4,11$ м⁴; $I_z=34,52$ м⁴.

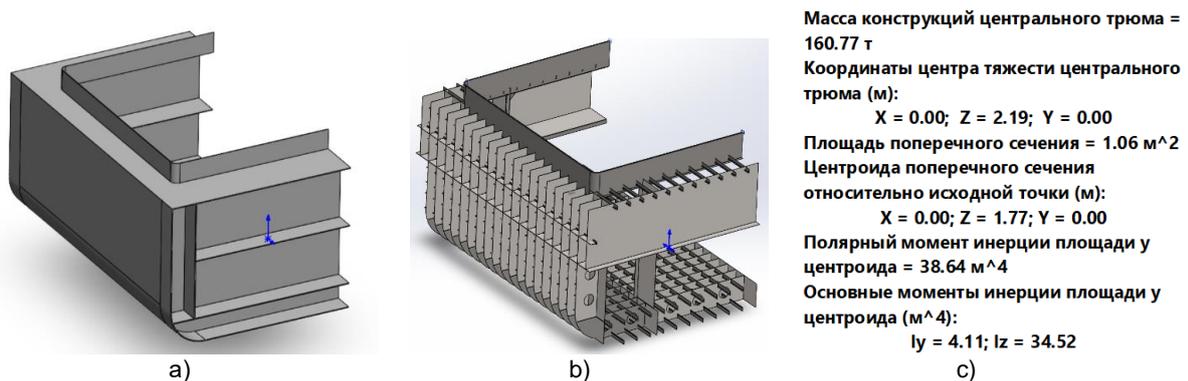


Рис. 12. 3D-модель центрального трюма:
а) эквивалентный брус (по ДП); б) реальные конструкции (по ДП); в) характеристики поперечного сечения в районе выреза

Fig. 12. 3D model of the central hold: a) equivalent beam; b) real structures; c) characteristics of the cross-section in area of the cutout

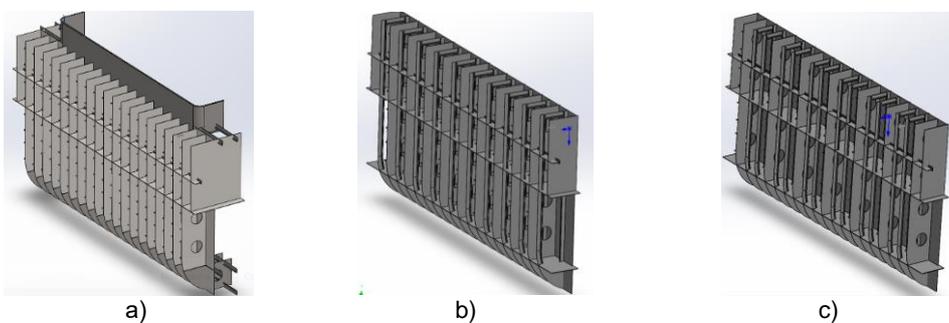


Рис. 13. Возможные варианты конструктивных решений:
а) диафрагма на каждом шпангоуте; б) диафрагма через шпацию; в) диафрагма через две шпации

Fig. 13. Possible design options:
 a) diaphragm at each frame; b) diaphragm through spacing; c) diaphragm through two spaces

Дальнейшие исследования направлены на оптимизацию и оценку НДС конструкций корпуса сухогрузных судов с широким раскрытием палубы и протяжёнными трюмами (паромов), в которых выделены три типа анализа: глобальный, частичный и локальный [2].

Глобальный анализ – оптимизация и оценка НДС всего корпуса судна (включающего основные элементы корпуса судна без учёта мелких деталей), находящегося под действием сил веса и поддержания воды, вызывающих общий изгиб и стеснённое кручение корпуса (рис. 14а).

Частичный анализ – оптимизация и оценка отдельных частей корпуса судна, 3D-модели которых содержат в дополнение к конструкциям для глобального анализа элементы основного набора, соизмеримые с размерами конечных элементов. Конструкции находятся под воздействием сил веса, поддержания и специфических нагрузок, размещённых внутри корпуса (рис. 14б).

Локальный анализ – оптимизация и оценка отдельных участков конструкций с концентраторами напряжений. В 3D-модели дополнительно создаются, если не были созданы ранее, полки и фланцы книц и бракет, срезки «на ус», все отверстия и вырезы, сварные швы (рис. 14с).

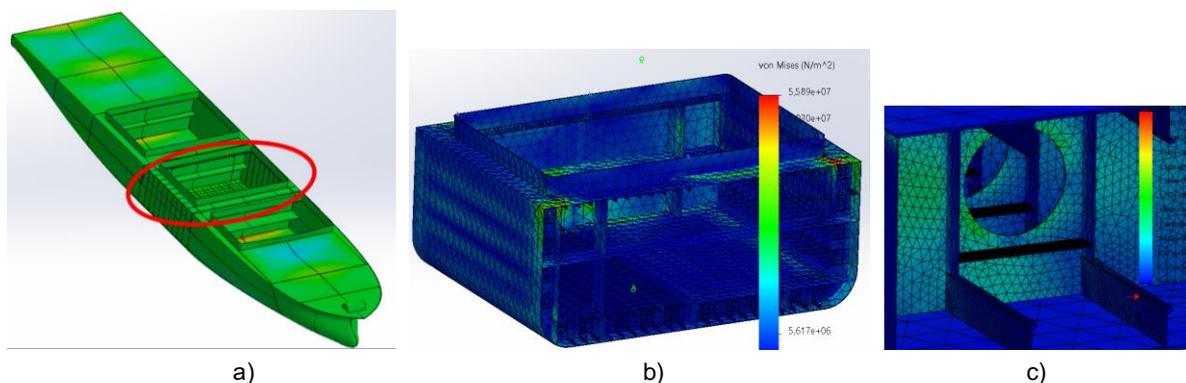


Рис. 14. Результаты анализа конструкций корпуса (напряжения по Мизесу): а) глобальный; б) частичный; в) локальный.

Fig. 14. Results of the analysis of hull structures (Mises stresses): a) global; b) partial; c) local.

Выводы

Предлагаемый подход к оптимизационному проектированию судовых корпусных конструкций с использованием современных информационных технологий на ранней стадии проектирования судна позволяет определить топологию и размеры элементов поперечного сечения эквивалентного бруса в любом районе. Оптимизация конструкций корпуса, наряду с оптимизацией других подсистем судна с системных позиций, позволяет по-новому смотреть на процесс проектирования и сопровождения судна на всех этапах жизненного цикла.

Суммарные напряжения (по Мизесу), возникающие в палубных и днищевых связях при одновременном действии на корпус судна крутящего, вертикального и горизонтального изгибающих моментов на косой волне, превышают напряжения на вершине волны, что во многом зависит от соотношения между моментами сопротивления поперечного сечения корпуса относительно горизонтальной и вертикальной нейтральных осей.

Следует отметить, что данные выводы можно сделать применительно к рассматриваемым объектам исследования, однако методический подход приемлем для судов различных размеров и назначений.

Заключение

Цифровизация судостроительной промышленности, процессов проектирования и постройки судов приводит к необходимости использования 3D-моделирования и систем числен-

ного анализа на отечественных предприятиях, и одновременно с этим, требует обязательного внесения изменений в нормативно-правовые документы, включая Правила РМРС.

В статье рассмотрены основные принципы оптимизации конструкций корпуса, формирования моделей и решения задач инженерного анализа, сформулированы предложения по совершенствованию использованных моделей и развитию методов проектирования конструкций с учётом особенностей формы корпуса и конструктивных (топологических) решений. Наряду с оптимизацией конструкций корпуса с позиций общей продольной прочности, созданные модели и проиллюстрированный в настоящем исследовании подход позволяют решать частные задачи, связанные с обеспечением местной прочности, устойчивости, надёжности и технологичности отдельных конструкций.

Сдерживающими факторами в развитии данного направления в отечественной практике проектирования судов являются: отсутствие качественного отечественного программного обеспечения высокого уровня, недостаточность нормативной базы, регламентирующей внедрение цифровых технологий в судостроение.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В.Г. Бугаев – постановка задачи, разработка методов исследования, создание 3D-модели, выполнение расчётов, анализ результатов; В.М. Кашаев – анализ отечественных и зарубежных источников, выполнение расчётов, анализ результатов, оформление; М.В. Китаев – разработка модели оптимизации характеристик и элементов судна и подсистем, выполнение расчётов, анализ результатов исследований.

V.G. Bugaev – problem statement, development of research methods, creation of a 3D model, calculations, analysis of results; V.M. Kashaev – analysis of domestic and foreign sources, calculations, analysis of results, design; M.V. Kitaev – development of a model for optimizing the characteristics and elements of the vessel and subsystems, performing calculations, analyzing the results of research.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Агеев А.Б. Разработка и применение цифровых двойников в судостроении и кораблестроении // Труды XX международной научно-практической конференции МОРИНТЕХ-ПРАКТИК «Информационные технологии в судостроении–2019», Санкт-Петербург, 10 июля 2019 г. Санкт-Петербург: Маринконф, 2019. С. 9–14.
2. Петров А.А., Морозова Е.А., Сохлаков А.В., Суворов В.А. Разработка руководства РС по оценке напряжённо-деформированного состояния судовых конструкций методом конечных элементов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2020. № 60/61. С. 75–83. EDN: KBSMFN
3. Чижиумов С.Д., Немов А.С., Бурменский А.Д., Тарануха Н.А., Боровков А.И. Принципы и структурная модель разработки цифрового двойника корпуса судна // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 2, № 2. С. 18–27. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.047>
4. Бугаев В.Г., Дам Ван Тунг. Обеспечение прочности корпуса рыболовного судна // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2019. № 2(39). С. 49–56. DOI: <https://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-6>
5. Бугаев В.Г., Бондаренко Ю.В., Дам Ван Тунг, Ковалев А.А. Оптимизация конструкций корпуса судна с учётом их технологичности // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 1(54). С. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-1/38-49>
6. Тряскин В.Н. Методология параметрического проектирования конструкций корпуса судна // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Специальный выпуск 2. С. 9–14. EDN: YQZQNJ
7. Тряскин В.Н., Юй Синьянь. Методика оценки характеристик поперечного сечения корпуса крупнотоннажного контейнеровоза на ранних стадиях проектирования судовых корпусных конструкций // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 2, № 3(45). С. 87–92. EDN: JYUHEK
8. Faltinsen O.M. Challenges in hydrodynamics of ships and ocean structures // Brodogradnja. 2007.

- Vol. 58. № 3. P. 268–277. URL: <https://hrcak.srce.hr/16590>
9. Новиков В.В., Турмов Г.П., Суров О.Э., Герман А.П., Молоков К.А., Китаев М.В. Повреждения и расчётный анализ прочности корабельных конструкций: монография / науч. ред. Г.Ю. Илларионов. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2020. 266 с. ISBN 978-5-7444-4735-9
 10. 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. EDN: STELQW
 11. Плотников К.В., Тряскин В.Н. Постановка и решение задачи проектирования поперечных танкерных рам в грузовой части крупнотоннажных нефтеналивных судов с использованием аппарата аппроксимации метода планирования эксперимента // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 2, № 3(45). С. 93–100. EDN: CMJYDD
 12. Бугаев В.Г., Дам Ван Тунг, Китаев М.В., Новиков В.В. К оптимизации формы и конструкций корпуса судна с системных позиций // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 4(57). С. 24–38. DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/24-38>
 13. Gordo J.M., Leal M. A tool for analysis of costs on the manufacturing of the hull // Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources. London: Taylor & Francis Group, 2018. P. 743–748.
 14. Leal M., Gordo J.M. Hull's manufacturing cost structure // Brodogradnja. 2017. Vol. 68, № 3. DOI: <https://dx.doi.org/10.21278/brod68301>

REFERENCES

1. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Ageev A.B. Development and application of digital twins in shipbuilding and shipbuilding. Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference Morintech-Practic “*Information Technologies in Shipbuilding–2019*”, St. Petersburg, July 10, 2019. Saint Petersburg, Morinconf Publ., 2019, pp. 9–14. (In Russ.).
2. Petrov A.A., Morozova E.A., Soklakov A.V., Suvorov V.A. Development of RS Guidelines for the assessment of the stress-strain state of ship structures by the finite element method. *Scientific and Technical Collection of the Russian Maritime Register of Shipping*, 2020, no. 60–61, pp. 75–83. (In Russ.).
3. Chizhiumov S.D., Nemov A.S., Burmenskiy A.D., Taranukha N.A., Borovkov A.I. Principles and framework model for the development of a ship hull digital twin. *Marine intellectual technologies*, 2021, vol. 2, no. 2(52), pp. 18–27. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.047>
4. Bugaev V.G., Dam Van Tung. Ensuring the strength of the fishing vessel hull. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2019, no. 2(39), pp. 49–56. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-6>
5. Bugaev V., Bondarenko Yu., Dam Van Tung, Kovalev A. Optimization of ship hull structures, taking into account their manufacturability. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023, no. 1(54), pp. 38–49. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-1/38-49>
6. Tryaskin V.N. Methodology of parametric designing of ship's hull structures. *Transactions of the Krylov State Research Center*, 2018, Special Issue 2, pp. 9–14. (In Russ.)
7. Tryaskin V.N., Yu Xinyan. Methodology of hull girder cross-sectional characteristics estimation on the preliminary stage of large containerships structural design. *Marine Intellectual Technologies*, 2020, vol. 2, no. 3(45), pp. 87–92. (In Russ.).
8. Faltinsen O.M. Challenges in hydrodynamics of ships and ocean structures. *Brodogradnja*, 2007, vol. 58, no. 3, pp. 268–277. URL: <https://hrcak.srce.hr/16590>
9. Novikov V.V., Turmov G.P., Surov O.E., German A.P., Molokov K.A., Kitaev M.V. Damage and computational analysis of the strength of ship structures / Sci. Ed. by G.Y. Illarionov. Vladivostok, Far Eastern University Publ., 2020, 266 p. (In Russ.).
10. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Complex approach to topological and parametric optimization of ship structures. *Transactions of the Krylov State Research Center*, 2020, no. 1(391), pp. 95–108. (In Russ.).
11. Plotnikov K.V., Tryaskin V.N. Formulation and solution of the problem of designing transverse tanker frames in the cargo part of large-tonnage oil tankers using the apparatus for approximation of the experiment planning method. *Marine Intellectual Technologies*, 2019, vol. 2, no. 3(45), pp. 93–100. (In Russ.).

12. Bugaev V.G., Dam Van Tung, Kitaev M.V., Novikov V.V. To the optimization of the shape and structure of the ship's hull from the system standpoint. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2023, no. 4(57), pp. 24–38. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/24-38>
13. Gordo J.M., Leal M. A tool for analysis of costs on the manufacturing of the hull. *In: Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources*. London, Taylor & Francis Group, 2018, pp. 743–748.
14. Leal M., Gordo J.M. Hull's manufacturing cost structure. *Brodogradnja*, 2017, vol. 68, no. 3. DOI: <https://dx.doi.org/10.21278/brod68301>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бугаев Виктор Григорьевич – доктор технических наук, профессор Департамента морской техники и транспорта Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),
✉ bugaev.vg@dvfu.ru

Viktor G. Bugaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Marine Engineering and Transport of Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Кашаев Владислав Михайлович – аспирант, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),
✉ vladikkashaev@mail.ru

Vladislav M. Kashaev, Postgraduate Student, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Китаев Максим Владимирович – кандидат технических наук, доцент, директор Департамента морской техники и транспорта Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),
✉ kitaev.mv@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5345-6333>

Maksim V. Kitaev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Marine Engineering and Transport of Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 12.02.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 25.02.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025