

Проектирование и конструкция судов

Научная статья

УДК 629.128

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/24-38>

В.Г. Бугаев, Дам Ван Тунг, М.В. Китаев, В.В. Новиков

БУГАЕВ ВИКТОР ГРИГОРЬЕВИЧ – д.т.н., профессор, bugaev.vg@dvfu.ru

КИТАЕВ МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., доцент, kitaev.mv@dvfu.ru

НОВИКОВ ВАЛЕРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, leka230243@gmail.com

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

ДАМ ВАН ТУНГ – к.т.н., преподаватель, damvantung@mail.ru

Факультет морской инженерии, Департамент промышленного инженерного менеджмента

Вьетнамский морской университет

Хайфон, Вьетнам

К оптимизации формы и конструкций корпуса судна с системных позиций

Аннотация. Изложен достаточно простой и эффективный способ оптимизации формы и конструкций корпуса судна с системных позиций с учетом ходкости, продольной прочности и кручения. Сформулированы три взаимосвязанные задачи: 1) оптимизация формы корпуса с целью обеспечения ходкости по критерию минимума сопротивления воды движению судна и требований к прочности и технологичности конструкций; 2) расположение помещений, размещение грузов и запасов для обеспечения заданной посадки и остойчивости, моделирования изгибающих моментов и перерезывающих сил на тихой воде и на волнении, определения напряженно-деформированного состояния конструкций (на основе эквивалентного бруса); 3) оптимизация конструкций корпуса судна по критериям минимума массы и (или) себестоимости их изготовления. Приведены результаты оптимизации формы корпуса и элементов эквивалентного бруса судна, которые позволяют выявить наилучшие проектные и конструктивные решения и оценить экономический эффект. Особое внимание уделено удифферентовке судна, определению напряжений и перемещений в связях корпуса на тихой воде, на вершине и подошве волны (при прогибе и перегибе судна), на косой волне (при кручении). *Ключевые слова:* оптимизация, компьютерное моделирование, общая прочность, материалоемкость

Для цитирования: 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.

Введение

Высокие требования к эксплуатационной надежности, экономической эффективности и безопасности транспортных, нефте- и рыбодобывающих комплексов и судов предопределили использование при их проектировании современных методов моделирования, оптимизации, численного анализа и САПР [2–4, 8]. Это позволяет проводить оптимизацию формы и конструкций корпуса и других доминирующих подсистем с системных позиций, обеспечить решение задач с учетом особенностей функционирования судов (ходкость и взаимодействие со льдом – для судов ледового плавания, швартовка в море – для рыболовных судов и т.п.), что повышает качество принимаемых решений [2, 3, 8].

Методологические принципы проектирования сложных объектов морской техники и их элементов предполагают использование [5, 6, 8, 9]:

- системного подхода;
- математического и численного моделирования;
- итерационных принципов решения задачи.

Системный подход предполагает выделение из всей совокупности подсистем наиболее значимых, с точки зрения решения поставленной задачи. В нашем случае это поверхность корпуса, компоновка (общее расположение), конструкции корпуса. Корпус судна в свою очередь может быть подразделен на среднюю часть (цилиндрическую вставку), носовую и кормовую оконечности и т.д. Принятие окончательного решения осуществляется не по локальным критериям (минимум сопротивления, стоимости корпуса и т.п.), а по критерию эффективности судна в целом.

Математическое и численное моделирование предполагает использование аналитических методов проектирования и оптимизации объектов морской техники на верхнем подуровне проектирования, и численное моделирование и оптимизацию подсистем на нижнем подуровне проектирования на основе 3D-моделей подсистем.

Итерационный принцип заключается в последовательном приближении к наилучшему решению задачи (с точки зрения глобального критерия) и принятию окончательного решения.

Цель работы – реализация методологических основ оптимизации формы и конструкций корпуса судна, обоснования основных компоновочных решений с системных позиций с целью снижения металлоёмкости, повышения технологичности конструкций и эффективности судна.

В качестве **объекта исследования** выбраны форма и конструкции корпуса судна, расположение основных помещений в полном грузу со 100% запасов, обеспечивающих посадку судна по грузовую ватерлинию. В качестве прототипа – пассажирское судно для доставки персонала на морские добычные и буровые платформы. Задача решается после оптимизации характеристик и элементов судна с помощью математической модели его проектирования на верхнем подуровне и определения технико-экономических и эксплуатационно-экономических показателей. В результате оптимизации формируется таблица выходных параметров $X_k^* = (L, B, T, H, \alpha, \beta, \delta, x_g, z_g, l_i, \dots)$, содержащая характеристики и элементы судна, часть из которых в дальнейшем будет использоваться в качестве переменных при оптимизации подсистем с помощью 3D-моделей (табл. 1).

Таблица 1

Таблица выходных параметров математической модели проектирования судна

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Параметры	L, м	B, м	T, м	H, м	D, т	W, м ³	DW, т	x_g , м	z_g , м	r, м	$P_{ко}$, т
2	Значения	60,0	15,5	4,0	6,0	2800	4655,0	392	-1,14	5,23	5,56	1252

Продолжение таблицы 1

	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	$P_{кн}$, т	$P_{об}$, т	P_m , т	P_t , т	v, уз	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	l_4 , м	y_j
2	640	381	135	286	16,0	10,8	16,8	4,8	12,0	...

Здесь и далее: L – длина между перпендикулярами, B – ширина, T – осадка, H – высота борта, D – водоизмещение, W – вместимость, DW – дедвейт, x_g – абсцисса центра тяжести, z_g – аппликата центра тяжести, r – метацентрический радиус, $P_{ко}$ – масса основного корпуса, $P_{кн}$ – масса надстройки, $P_{об}$ – масса оборудования, P_m – масса энергетической установки, P_t – масса топлива, v – расчетная скорость; l_i – длина i-го отсека; y_j – множители Лагранжа ограничений.

Для достижения поставленной цели необходимо последовательно решить три задачи, информационно и программно связанные между собой.

Задача 1. Оптимизация формы корпуса с точки зрения ходкости на тихой воде по критерию минимум сопротивления воды движению судна и, одновременно с этим, формы носовой и кормовой оконечностей, длины и положения цилиндрической вставки, участков плоского борта и днища.

Задача 2. Компоновка общего расположения судна. Распределение весовой нагрузки, определение положения продольных и поперечных переборок, высоты двойного дна и т.д. с целью удифферентовки и моделирования нагрузок, действующих на корпус судна на тихой воде и на волнении, и определения характеристик эквивалентного бруса.

Задача 3. Оптимизация конструкций корпуса с точки зрения обеспечения общей продольной прочности и технологичности по критериям минимума массы или себестоимости изготовления конструкций.

В силу ограниченного объема в настоящей статье изложено решение задач 1 и 2, а задача 3 будет рассмотрена в последующих публикациях.

Решение задач осуществляется с помощью программного обеспечения Simulation и FlowSimulation SolidWorks без перекомпоновки исходной информации при переходе от одной задачи к другой.

Чтобы показать универсальность и простоту подхода обоснования формы и конструкций корпуса, в качестве объекта исследования выбраны подсистемы судна, реализованные в виде гибких 3D-моделей с широким использованием параметрических и ассоциативных связей и обширным спектром оптимизируемых переменных.

Первую задачу в терминах математического программирования можно сформулировать следующим образом: необходимо определить такие параметры формы корпуса $X_{k=1}$, при которых судно имеет минимальное сопротивление $R(X_{k=1}) \rightarrow \min$ и выполняются требования, предъявляемые к элементам поверхности корпуса, представленные в виде ограничений $\Psi_j(X_{k=1}) \geq a_j, j=1, \dots, m$, где j – индекс ограничения; m – количество ограничений; a_j – требования [3].

В качестве варьируемых параметров $X_{k=1}$ можно выбрать весь вектор оптимизируемых переменных $X_{k=1}$, либо набор отдельных его компонентов:

L – длину между перпендикулярами, $L_{\min} \leq L \leq L_{\max}$, м;

B – ширину по ГВЛ, $B_{\min} \leq B \leq B_{\max}$, м;

T – осадку по ГВЛ, $T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$, м;

H – высоту борта по главную палубу, $H_{\min} \leq H \leq H_{\max}$, м;

r_c – радиус скругления скулы, $r_{c \min} \leq r_c \leq r_{c \max}$, м;

l_n, l_k – длину цилиндрической вставки в носовой и кормовой оконечностях, $l_{\min} \leq l \leq l_{\max}$, м;

$l_{\delta n}, l_{\delta k}$ – длину плоского участка борта на уровне главной палубы в носовой и кормовой оконечностях, $l_{\delta \min} \leq l_{\delta} \leq l_{\delta \max}$, м;

α_o – угол притыкания ГВЛ к диаметральной плоскости, $\alpha_{o \min} \leq \alpha_o \leq \alpha_{o \max}$, град;

– параметры формы бульба.

Курсивом выделены переменные, которые в настоящем исследовании приняты постоянными в силу большой размерности задачи.

Ограничения:

- водоизмещение по ГВЛ, $D_{\min} \leq D(X_{k=1}) \leq D_{\max}$, т;
- вместимость, $W_{\min} \leq W(X_{k=1}) \leq W_{\max}$, м³;
- аппликата центра величины, $Z_{c \min} \leq Z_c(X_{k=1}) \leq Z_{c \max}$, м;
- абсцисса центра величины, $X_{c \min} \leq X_c(X_{k=1}) \leq X_{c \max}$, м;
- метацентрический радиус, $r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$, м.

Цель (критерий): минимальное сопротивление $R(X_{k=1}) \rightarrow \min$.

Описание 3D-модели поверхности корпуса

Начальный вариант (3D-модель) поверхности корпуса судна можно выбрать из предварительно созданной библиотеки в зависимости от типа и назначения судна, скорости и условий

эксплуатации и т.п. На рисунках 1 и 2 приведены суда различного назначения, которые могут иметь одинаковый начальный вариант поверхности, соответствующий элементам таблицы 1.

Суда имеют плавные обводы без сломов, цилиндрическую вставку, протяженный участок плоского борта и днища, бульбовую носовую оконечность, лыжеобразную форму кормовой оконечности и транцевую корму.

3D-модель позволяет генерировать поверхность корпуса судна в достаточно широких пределах главных размерений (L , B , T , H) с различными значениями коэффициента общей полноты и длины цилиндрической вставки (δ , $l_{цв}$).

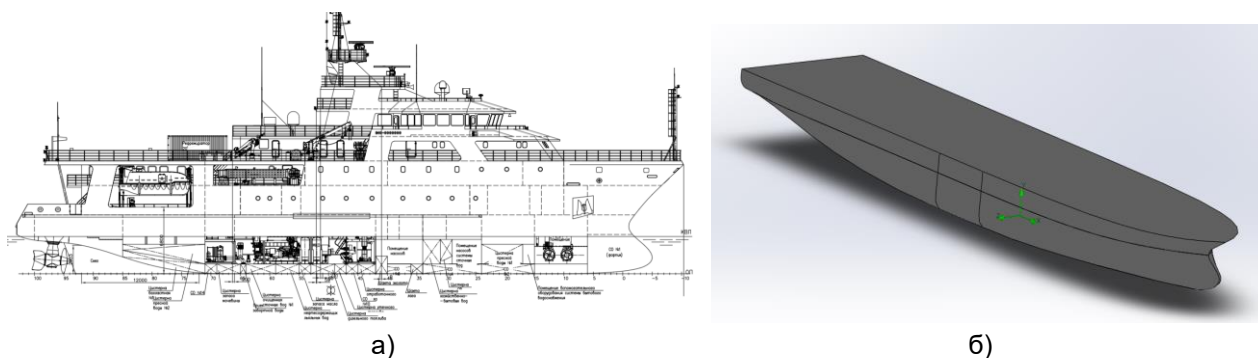


Рис. 1. Пассажирское судно пр. 22480:
а) схема общего расположения (источник: nevainter.com); б) 3D-модель поверхности

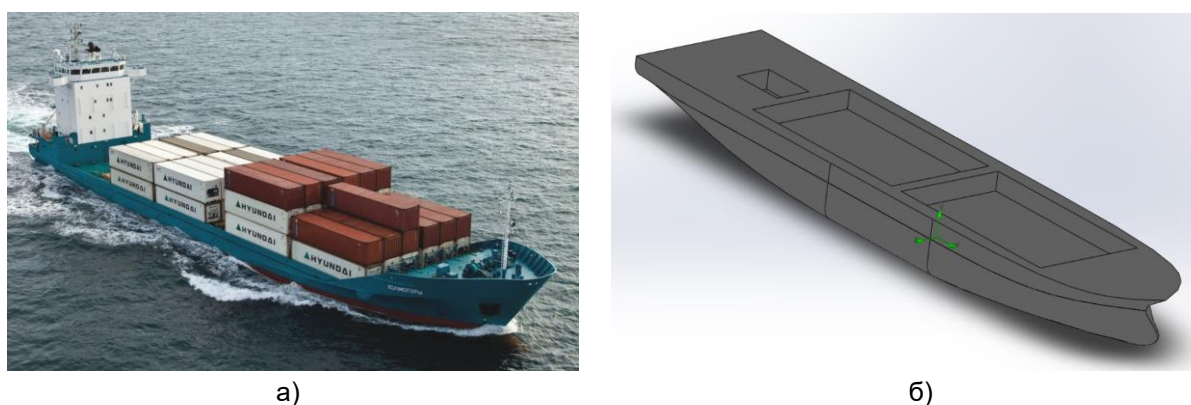


Рис. 2. Сухогрузное судно Холмогоры:
а) фото (источник: https://wiki2.org/ru/Файл:Kholmogory_jpg); б) 3D-модель поверхности

Оптимизация формы корпуса

Отношение главных размерений L/B , длина и положение цилиндрической вставки, положение центра, величина по длине судна оказывают существенное влияние на сопротивление воды, посадку, остойчивость и мореходные качества, а также на массу и технологичность корпуса, поэтому они выбраны в качестве основных переменных и ограничений. Меньшее влияние, но при определенных сочетаниях – заметное, оказывают такие элементы, как углы притыкания грузовой ватерлинии к ДП и форма бульба.

Результаты анализа начального варианта формы корпуса судна на тихой воде представлены в таблице 2. На рисунке 3 изображена картина распределения давления и линий обтекания корпуса судна потоками воды.

Просматривается относительно равномерное распределение давления по поверхности корпуса, повышенные давления наблюдаются в районе носовой (бульба) и кормовой оконечностей, которые приводят к образованию носовой и кормовой групп волн. Линии потока воды относительно плавно обтекают корпус судна, тем не менее формируя подпорную волну в носовой оконечности и попутный поток в кормовой оконечности, который, отрываясь

от корпуса, создает полосу завихрений.

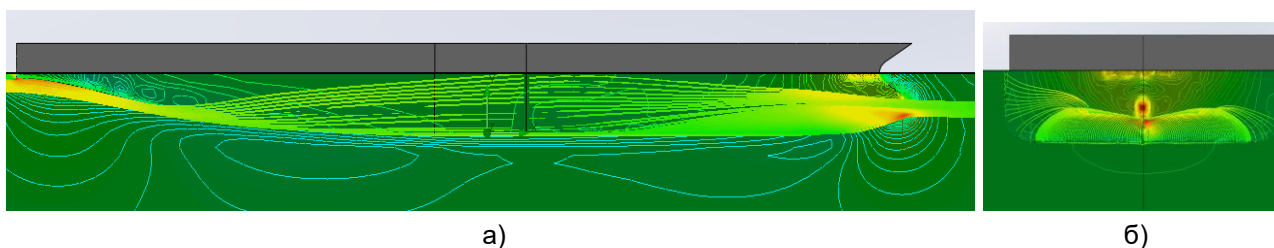


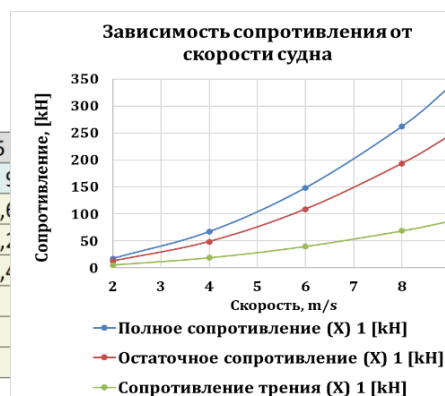
Рис. 3. Картина распределения давления и линий обтекания корпуса судна: а) вид сбоку; б) вид спереди

Таблица 2

Сводная таблица

Зависимость сопротивления воды от скорости движения судна

Цель (Значение)	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5
Скорость в направлении X [m/s]	2	4	6	8	9
Полное сопротивление (X) 1 [кН]	17,2	66,8	148,1	261,7	335,6
Остаточное сопротивление (X) 1 [кН]	12,2	48,4	108,6	193,2	245,2
Сопротивление трения (X) 1 [кН]	5	18,4	39,5	68,4	86,4
Объемное водоизмещение [м ³]	2799,2				
Смоченная поверхность [м ²]	1252,6				
Вместимость [м ³]	4655,1				



На рисунке 4 приведена зависимость сопротивления воды движению судна от отношения L/B и длины цилиндрической вставки l_{цв} (при выполнении всех ограничений).

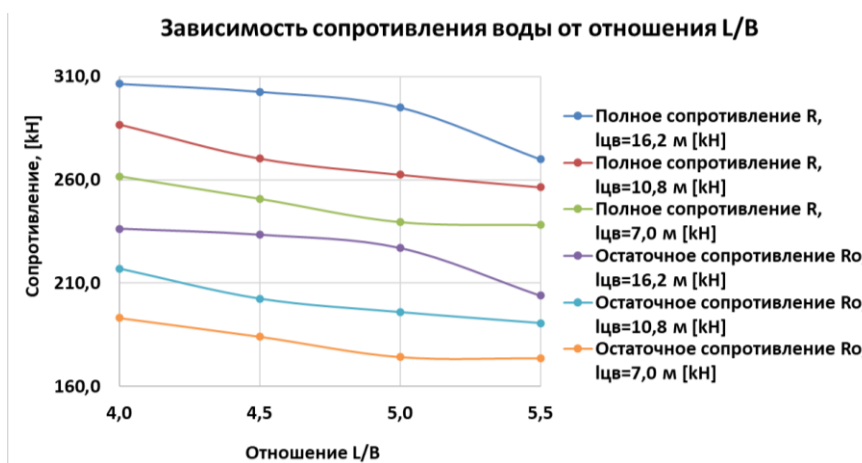


Рис. 4. Зависимость сопротивления воды движению судна от L/B и l_{цв}

Поскольку D и W являются неизменными величинами, то при увеличении L/B увеличивается площадь смоченной поверхности и сопротивление трения, а остаточное сопротивление уменьшается. Одновременно с этим масса и стоимость корпуса судна увеличиваются. Поиск компромиссного решения в этом случае связан с определением влияния L/B в каждой из подсистем на локальный критерий и на эффективность судна, выраженные через множители Лагранжа ограничений.

При определении отношения L/B и других параметров формы корпуса приходится также учитывать их влияние на поворотливость, ходкость на волнении, что представляет собой достаточно сложную задачу.

Выводы

Наилучшим вариантом с точки зрения ходкости и удовлетворения всех требований является судно с наибольшим отношением $L/B=5,5$ и минимальной длиной цилиндрической вставки $l_{цв}=7,0$ м.

Из всей совокупности потенциально возможных вариантов в дальнейших исследованиях обратим особое внимание на вариант 1 ($L/B = 4,0$ и $l_{цв} = 7,0$ м), выбранный в качестве начального, и на вариант 2 ($L/B = 5,43$ и $l_{цв} = 7,0$ м), наилучший с точки зрения ходкости.

В силу большого количества доминирующих подсистем процесс принятия окончательного решения превращается в сложную проблему и приводит к необходимости оценить, как скажутся локальные решения на эффективности судна в целом.

Задача 2. Цель – внутри поверхности корпуса судна, полученной при решении задачи 1, определить компоновку судна, размещение грузов, запасов и балласта, форму и положение ватерлинии (на тихой воде и на волне) с целью его удифферентовки и моделирования нагрузок (изгибающих моментов M_{sw} и перерезывающих сил N_{sw}), действующих на корпус судна на тихой воде и на волнении, а также элементы эквивалентного бруса.

Постановка задачи. Необходимо найти такой вектор параметров $X_{k=2}$, определяющих основные компоновочные решения и элементы эквивалентного бруса, при которых критерий эффективности массы эквивалентного бруса достигает минимального значения и выполняются требования, предъявляемые к водоизмещению, вместимости, посадке, остойчивости и прочности судна, определяющие область допустимых решений [2].

Описание 3D-модели

Элементы общего расположения судна определены с помощью математической модели судна. На рисунке 5 приведена схема расположения основных помещений судна (разрез по ДП).

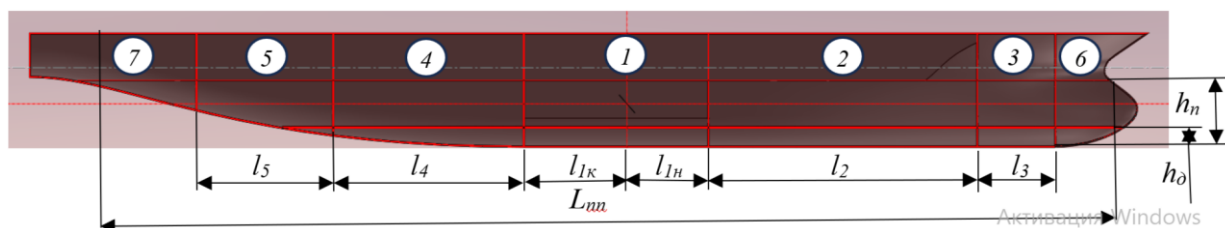


Рис. 5. Схема расположения основных помещений судна (продольный разрез):
 1 – машинное отделение, сухой отсек, цистерны дизельного топлива; 2 – помещения насосов и цистерн жидких сред; 3 – помещение подруливающих устройств; 4 – машинное отделение, сухой отсек; 5 – помещение ГРУ и ГРЩ, цистерны пресной воды и балласта; 6 – форпик; 7 – помещение ВРК

Описание модели: обеспечение вместимости, посадки и начальной остойчивости (удифферентовки) судна на тихой воде достаточно подробно изложено авторами в статье [13]; оптимизации конструкций по критериям минимум массы и себестоимости изготовления – в статье [14].

Для решения задачи 2 3D-модели были преобразованы:

- Поперечные переборки, стенки цистерн, перекрытия двойного дна и борта, обладая определенной толщиной и массой ($P_{ко}$), представляют собой элементы эквивалентного бруса.
- В состав варьируемых переменных $X_{k=2}$ дополнительно введены:
 - размеры и положение основных помещений и отсеков: длина l_i ; высота h_i ; ширина двойного борта b_i i -го отсека;
 - толщину основных элементов эквивалентного бруса, s_g .
- В состав ограничений включены перемещения ($u_{рез}$), нормальные напряжения (σ_x , σ_y , σ_z) и напряжения по Мизесу (σ_{Mis}) в конструкциях корпуса (элементах эквивалентного бруса).

Расчет нагрузки, вместимости, посадки и метацентрического радиуса, перемещений и напряжений выполняется по 3D-модели судна с помощью инструментов САПР.

Водоизмещение порожнем рассчитывается по формуле:

$$D_{пор} = \sum_q P_q,$$

где P_q – масса q-го раздела нагрузки (металлического корпуса, оборудования корпуса, судовых устройств, энергетической установки, судовых систем и др.), т.

Масса и координаты центра тяжести металлического корпуса определяется по 3D-модели конструкций корпуса как подсистемы судна. Масса и координаты центра тяжести остальных разделов нагрузки (пока не принято окончательное решение) – по приближенным формулам, а при наличии библиотечных элементов – в соответствии с их фактическими значениями.

Дедвейт определяется по формуле:

$$DW = \sum_q P_q,$$

где P_q – масса q-го раздела дедвейта (груза, топлива и масла, воды, балласта), т.

Вместимость определяется по 3D-модели общего расположения:

$$W = \sum_i W_i,$$

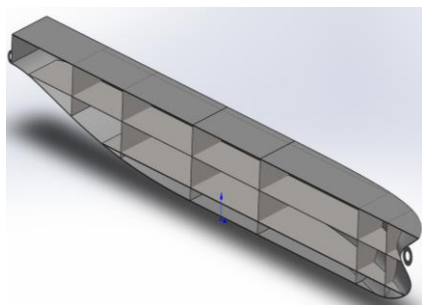
где W_i – объем i-го помещения (грузовых, жилых и служебных помещений, машинного отделения, топливных и масляных цистерн, цистерн пресной воды и балласта), м³.

Критерием является масса элементов эквивалентного бруса:

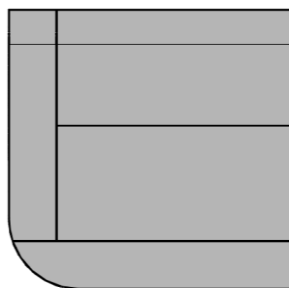
$$f_{k=2}(X^*, X_{k=1}, X_{k=2}) \rightarrow \min M(X^*, X_{k=1}, l_i, b_i, h_i, s_g),$$

где $M(X^*, X_{k=1}, l_i, b_i, h_i, s_g)$ – масса элементов эквивалентного бруса в функции варьируемых переменных l_i, b_i, h_i и $X_{k=1}$, т.

Решение задачи. Корпус судна на данном этапе исследования представляет собой тонкостенную балку (для сухогрузных судов – открытого типа), соединенную с достаточно жесткими конструкциями в носовой и кормовой оконечностях и имеющую одинаковые с корпусом судна площадь, моменты инерции и сопротивления поперечного сечения, массу и положение центра тяжести по высоте, элементы которой сосредоточены в районе бортов, палуб, платформ и днища, а также продольных и поперечных переборок (рис. 6).



а)



б)

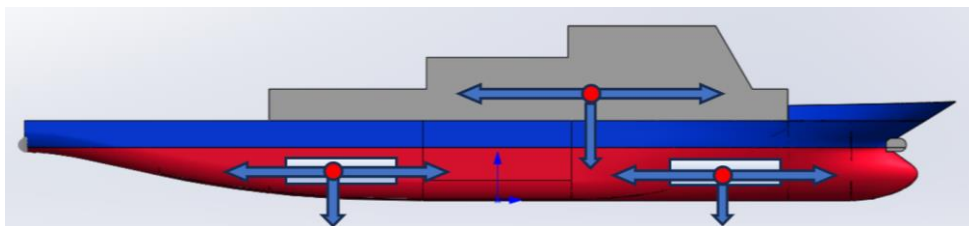
Элементы основного корпуса и поперечного сечения
 Масса = 1252 т.
 Координаты центра тяжести (м):
 $x=-2,52; y=0; z=3,48$.
 Площадь сечения = 4,21 м².
 Центроида относительно исходной точки (м):
 $x=0,0; y=0,0; z=2,72$.
 Моменты инерции у центроида (м⁴): $I_x=21,21; I_y=96,63$.

в)

Рис. 6. Элементы основного корпуса:
 а) 3D-модель конструкций; б) эквивалентный брус;
 в) элементы основного корпуса и поперечного сечения

Корпус судна находится под действием сил веса и поддержания воды, вызывающих общий изгиб и стесненное кручение корпуса (рис. 7), стрелками показаны перемещения нагрузки и элементов эквивалентного бруса. Стесненное кручение замкнутых профилей приводит к искажению формы поперечного сечения и оказывает существенное влияние на работу конструкций в средней части судна. Размеры корпуса судна в процессе оптимизации могут изменяться в пределах отношения длины к ширине $L/B=4,0 \div 5,47$ и ширины к осадке $B/T=3,5 \div 5,0$.

Таким образом, реальное поперечное сечение корпуса судна временно (до оптимизации конструкций) заменено совокупностью продольных и поперечных связей (эквивалентным брусом), равных реальному по сопротивляемости продольному изгибу.



Водоизмещение
D=2800 т;
Масса корпуса
P_к=1892 т;
Центр тяжести, м:
x_g=-1,14; z_g= 5,03.

Рис. 7. Судно на тихой воде

Таблица 3

Результаты удифферентовки судна на тихой воде

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Параметры	L, м	B, м	T, м	H, м	D, т	W, м ³	DW, т	x _g , м	z _g , м	г, м	P _{ко} , т
2	Значения	60,0	15,5	4,0	6,0	2800	4655,0	392	-1,14	5,03	5,56	1252

Продолжение таблицы 3

	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	P _{кн} , т	P _{об} , т	P _м , т	P _т , т	l _{1к} , м	l _{1н} , м	l ₂ , м	l ₃ , м	l ₄ , м	l ₅ , м
2	640	381	135	286	5,4	5,4	16,8	4,8	12,0	8,4

После удифферентовки судна на тихой воде и определения толщин основных элементов эквивалентного бруса (табл. 3) осуществляется посадка судна на вершину, подошву и косую волну, при этом силы поддержания (объемное водоизмещение) соответствуют нагрузке (табл. 4).

Уравнение волнового профиля:

$$h_B = \pm h_{Bl} \cdot \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{L} \right),$$

где h_{Bl} – полувысота эквивалентной волны, м; L – длина волны (судна), м.
Знак (+) – на подошве волны, знак (–) – на вершине волны.

Таблица 4

Положение судна на волне, массовые характеристики

Положение судна	Профиль волны, уравнение волны	Элементы судовой поверхности
на подошве волны 	$h_B = 2,33 + 3,25 * 0,5 * (1 - \cos(2 * 3,14 * x / 60,0)), \text{ м}$	D = 2791 т; $\Omega = 2650 \text{ м}^2$; Центр величины, м: x _c = -3,78; z _c = 2,52; y _c = 0,0
на вершине волны 	$h_B = 5,545 - 3,25 * 0,5 * (1 - \cos(2 * 3,14 * x / 60,0)), \text{ м}$	D = 2814 т; $\Omega = 1885 \text{ м}^2$; Центр величины, м: x _c = 0,12; z _c = 2,45; y _c = 0,0
на косой волне 	$h_B = 3,55 + 3,25 * 0,5 * (1 - \cos(2 * 3,14 * x / 60,0)), \text{ м};$ курсовой угол 70 град.	D = 2795 т; $\Omega = 2208 \text{ м}^2$; Центр величины, м: x _c = -2,34; z _c = 2,42; y _c = 0,0

Для определения крутящих и изгибающих моментов необходимо задать интенсивность волновых давлений на корпус судна при различных условиях посадки, что моделируется в исследовании с помощью уравнения профиля волны и уравнения гидростатического давления. Уравновешивание сил веса и поддержания осуществляется перемещением профиля волны по оси z до достижения равенства $D = \gamma V$. Для посадки без дифферента ($x_c = x_g$) – по оси x . Гидростатическая нагрузка от давления воды распределена по закону вида $P_c = \gamma g t$, где t – осадка (уровень воды) с учетом профиля волны, м.

Движение судна косым курсом вызывает появление в сечениях корпуса вертикальных и горизонтальных составляющих волновых нагрузок, что в свою очередь приводит к появлению изгибающих и крутящих моментов и связанных с ними перемещений и деформаций, касательных и нормальных напряжений в сечениях корпуса [7].

В силу незначительного влияния продольной и бортовой качки на усилия, вызывающие кручение, будем рассматривать кручение без учета этих параметров.

Крепление модели осуществляется на зафиксированных шарнирах, на сферических или цилиндрических гранях в зависимости от формы изгиба, допускающих три степени свободы (3 перемещения) для сеток твердого тела (рис. 8).

Поскольку сила тяжести и сила поддержания равны, а центр тяжести и центр величины находятся на одной вертикальной прямой (за некоторым исключением), то система уравновешена и реакции на гранях крепления близки нулю.

Нагрузка. Расчет выполняется при действии нагрузок, включающих собственный вес конструкций и оборудования, жидких сред на внутренние конструкции и гидростатическое давление воды на обшивку корпуса. Моделируемые нагрузки максимально приближены к реально действующим.

Весовая нагрузка и координаты центра тяжести её составляющих определяются в процессе удифферентовки и уравновешивается силами поддержания. Расчетная нагрузка, действующая на корпус судна со стороны моря, определяется в соответствии с Правилами РМРС и включает в себя гидростатическое давление сил поддержания в зависимости от профиля волны (от посадки на тихой воде, на вершине, подошве и косой волне).

Волновая нагрузка определяется по оси x уравнением профиля волны (синусоида), по оси z – уравнением гидростатического давления воды (по треугольнику).

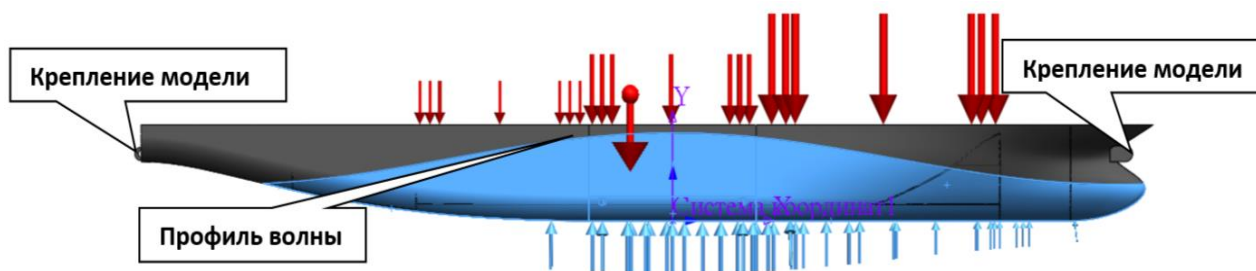


Рис. 8. Судно на вершине волны. Нагрузка и крепление

Для оценки общей продольной прочности судна необходимо:

- определить наибольшие абсолютные значения изгибающих моментов M_{sw} и перерезывающих сил N_{sw} на тихой воде, на вершине и подошве волны (при прогибе и перегибе судна), на косой волне (при кручении), действующие в вертикальной и горизонтальной плоскостях;
- установить требования, предъявляемые Правилами РМРС, к элементам поперечного сечения корпуса (к моменту сопротивления и моменту инерции, максимальным и допускаемым напряжениям), выступающим в качестве ограничений;
- определить моменты сопротивления и инерции поперечного сечения корпуса, обеспечивающих прочность продольных связей, напряжения и перемещения в связях корпуса.

Значения волновых нагрузок на вершине волны превышают значения на подошве волны, поскольку носовая и кормовая оконечности оказываются как бы в подвешенном состоянии при совмещении вершины волны с миделем и уравнивании сил веса и поддержания, а на подошве волны силы поддержания распределены более равномерно по длине судна, что подтверждается расчетами.

На рисунках 9, 10 представлены результаты расчетов напряженно-деформированного состояния начального варианта (до оптимизации) конструкций корпуса судна как тонкостенной коробчатой балки переменного сечения (эквивалентного бруса) на подошве волны, на вершине волны, на косой волне.

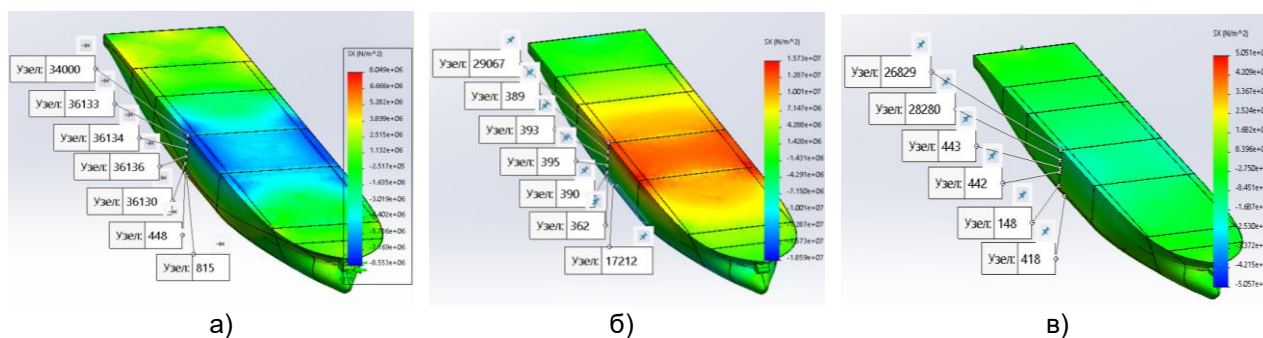


Рис. 9. Эпюры нормальных напряжений в обшивке бортового перекрытия (эквивалентного бруса):
 а) на подошве волны; б) на вершине волны; в) на косой волне

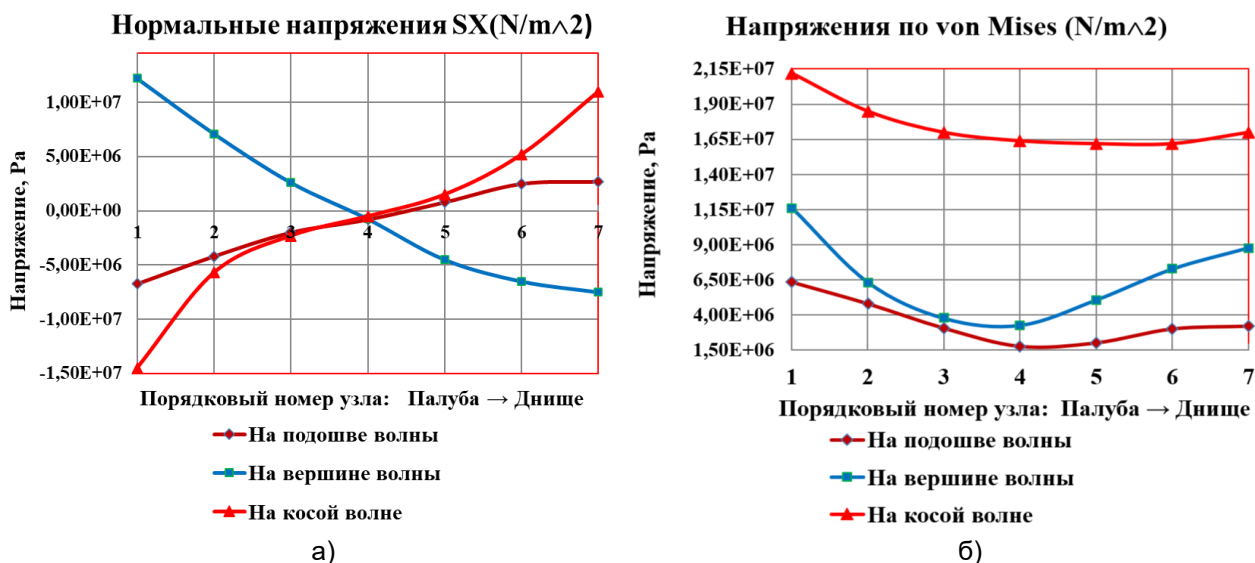


Рис. 10. Напряжения в обшивке бортового перекрытия:
 а) нормальные напряжения; б) напряжения по Мизесу

Особый интерес представляет анализ напряженно-деформированного состояния корпуса судна на косой волне (рисунки 11, 12). На рисунке 11 приведена эпюра результирующих узловых перемещений конструкций палубного перекрытия в районе соединения со вторым бортом и распределение перемещений по длине судна, на рисунке 12 – зависимость нормальных узловых напряжений в конструкциях палубного перекрытия в районе соединения со вторым бортом (а) и в районе поперечной переборки цилиндрической вставки (б).

В результате расчетов определено положение продольных и поперечных переборок, платформ, настила второго дна, размещение грузов и запасов, при которых судну обеспечены все требования, предъявляемые в виде ограничений, и предварительные характеристики эквивалентного бруса.

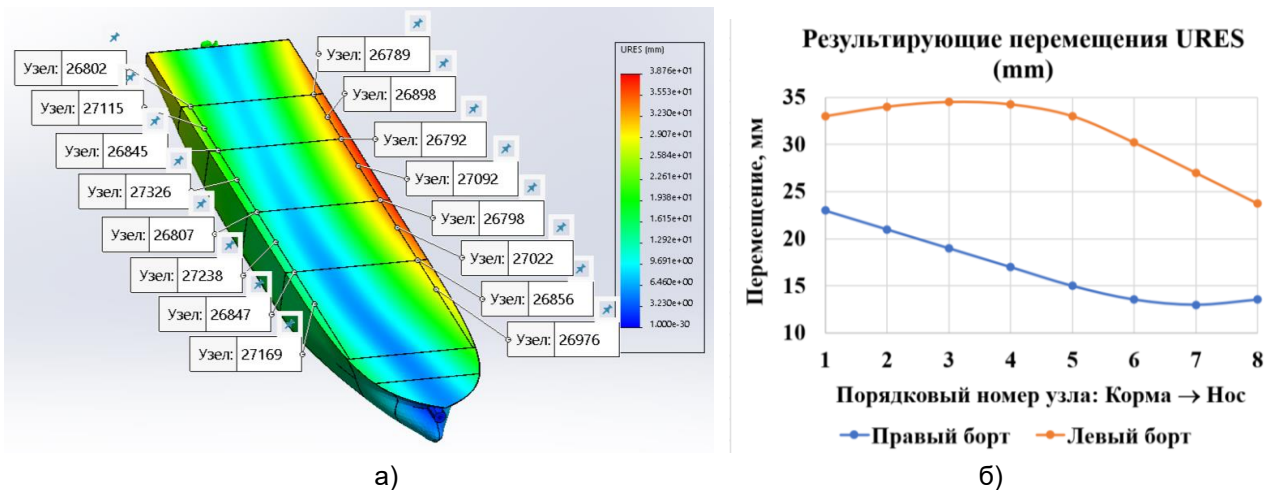


Рис. 11. Результирующие перемещения конструкций палубного перекрытия в районе соединения со вторым бортом на косой волне:
 а) эпюра перемещений; б) зависимость перемещений по длине судна

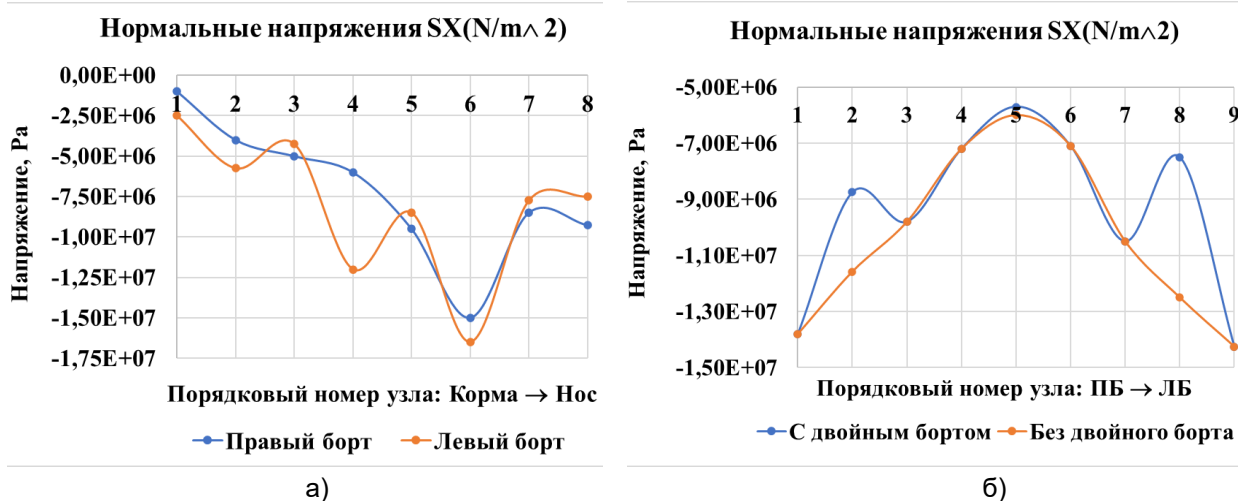


Рис. 12. Нормальные напряжения в конструкциях палубного перекрытия на косой волне:
 а) в районе соединения со вторым бортом; б) в районе поперечной переборки цилиндрической вставки

В процессе оптимизации произошло перераспределение материала по корпусу судна, в том числе и в районе мидель-шпангоута, масса корпуса уменьшилась на 106 т по сравнению с начальным значением, конструкции стали более напряженными (напряжения возросли на 10–20%), но в пределах допустимого. Цветовая гамма эпюр напряжений стала более равномерной, что говорит о создании равнопрочного эквивалентного бруса как в средней части корпуса, так и в оконечностях.

Предлагаемый подход позволяет с высокой степенью точности определить характеристики элементов эквивалентного бруса и общей продольной прочности:

- моменты инерции I_y и I_z , положение центра тяжести поперечного сечения относительно исходной точки;
- напряжения и перемещения в связях корпуса на тихой воде, на вершине и подошве волны (при прогибе и перегибе судна), на косой волне (при кручении);
- при балочной идеализации – изгибающие моменты M_{sw} и перерезывающие силы N_{sw} на тихой воде, на вершине и подошве волны, на косой волне, действующие в вертикальной и горизонтальной плоскостях, крутящие моменты в зависимости от отношения длины волны к длине судна и направления движения судна.

Одновременно с этим можно включить в состав эквивалентного бруса надстройку и оценить её влияние на общую прочность судна при изгибе, прогибе и на косой волне. На рисунке 13 приведены эпюры результирующих перемещений и нормальных напряжений, возникающих в конструкциях корпуса на подошве волны с учетом влияния надстройки.

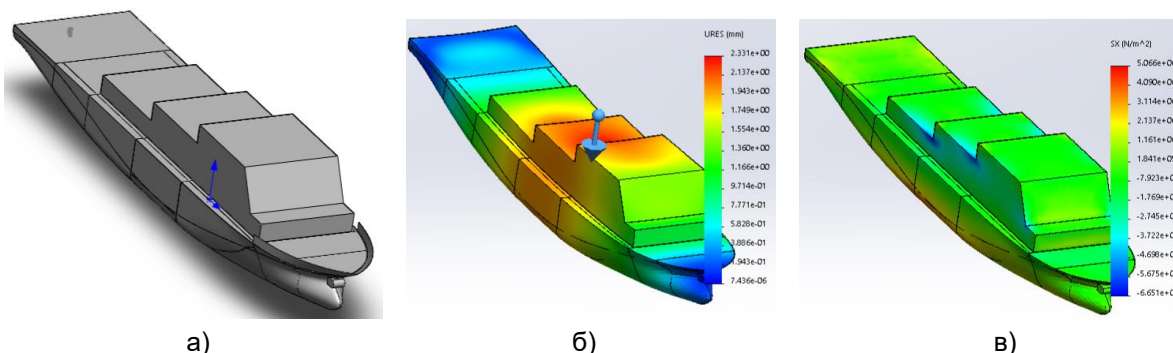


Рис. 13. Влияние надстройки на общую прочность судна (на подошве волны):
 а) 3D-модель; б) эпюра результирующих перемещений; в) эпюра нормальных напряжений

Направления дальнейших исследований. Как было сказано выше, решение 3 задачи, посвященной оптимизации топологии и размеров связей конструкций корпуса, по критериям минимума массы или себестоимости изготовления, и являющейся логическим продолжением двух предыдущих, будет рассмотрено в следующей публикации (рис. 14). Известными величинами здесь являются характеристики и элементы судна X^* , полученные на верхнем подуровне проектирования, параметры формы корпуса судна $X_{k=1}$, компоновка, форма и положение волновой ватерлинии и элементы эквивалентного бруса $X_{k=2}$.

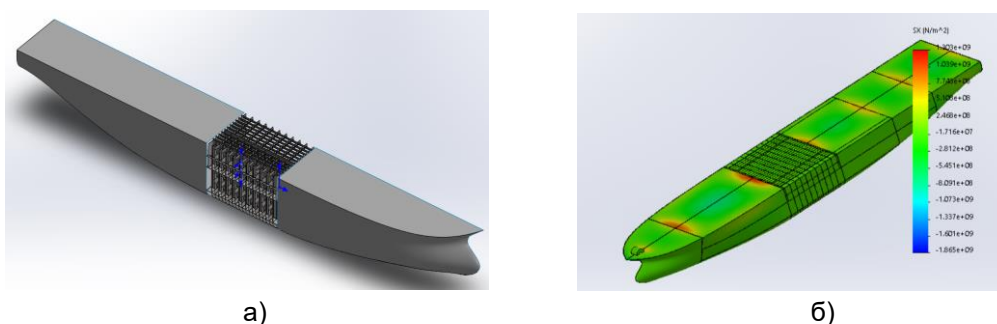


Рис. 14. Оптимизация конструкций корпуса:
 а) 3D-модель; б) эпюра нормальных напряжений S_x на тихой воде

Системный подход предполагает определение приращения экономической эффективности судна (выраженные через множители Лагранжа) от оптимизации формы и конструкций корпуса, компоновки основных помещений и решения локальных задач (обеспечение устойчивости, надежности и технологичности конструкций).

Выводы

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

- наибольшие абсолютные значения изгибающих моментов M_{sw} и перерезывающих сил N_{sw} , действующих в вертикальной плоскости, возникают на вершине волны в силу специфики формы корпуса;
- максимальные нормальные напряжения и напряжения по Мизесу возникают на миделе в районе соединения обшивки бортового и палубного перекрытий при кручении (посадке судна на косой волне);
- суммарные напряжения в связях корпуса складываются из напряжений от скручивания корпуса и изгиба в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Результаты оптимизации позволяют на каждой итерации *поверхность – конструкции корпуса* найти не только наилучшие с точки зрения сопротивления параметры формы корпуса, но и провести анализ влияния формы корпуса на напряженно-деформированное состояние сначала эквивалентного бруса, а в дальнейшем на прочность и технологичность реальных конструкций. Итеративный процесс прекращается при достижении цели.

Заключение

Изложен достаточно простой и эффективный способ оптимизации формы и конструкций корпуса судна на ранних стадиях его проектирования с учетом ходкости и общей прочности с целью снижения металлоёмкости, и в дальнейшем повышения технологичности и эффективности судна в целом.

Определение напряженно-деформированного состояния судна на косой волне является наиболее сложной задачей из рассмотренных выше, поскольку приводит к необходимости моделирования крутящего момента и изгибающих моментов в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Предлагаемое решение задачи предполагает приложение гидростатической нагрузки на корпус судна в соответствии с волновым профилем и получение для анализа конструкций перемещений, нормальных и суммарных напряжений и напряжений по Мизесу.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Битюков М.А., Герасимов К.Д., Кириллов П.А., Мудрик П.С., Чистяков Р.С. Применение численных методик для оценки влияния непрямоугольности корпуса судна на величину волновых нагрузок // Труды Крыловского государственного центра. 2022. Спец. вып. 1. С. 98–101. <https://www.doi.org/10.24937/2542-2324-2022-1-S-I-98-101>
2. Бугаев В.Г., Дам Ван Тунг. Обеспечение прочности корпуса рыболовного судна // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2019. № 2(39). С. 49–56. <https://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-6>
3. Бугаев В.Г., Дам Ван Тунг, Бондаренко Ю.В. Оптимизация формы корпуса рыболовных судов // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2020. № 2(43). С. 35–45. <https://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-4>
4. 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. <https://www.doi.org/10.24937/2542-2324-2020-1-391-95-108>
5. Пашин В.М. Оптимизация судов. Л.: Судостроение, 1983. 296 с.
6. 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. № 3(45). Т. 2. С. 93–100.
7. Повреждения и расчетный анализ прочности корабельных конструкций: монография / В.В. Новиков, Г.П. Турмов, О.Э. Суров, А.П. Герман, К.А. Молоков, М.В. Китаев; науч. ред. Г.Ю. Илларионов. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2020. 266 с.
8. Тряскин В.Н. Методология параметрического проектирования конструкций корпуса судна // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Спец. вып. 2. С. 9–14. <https://www.doi.org/10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-9-14>
9. Тряскин В.Н., Юй Синьянь. Методика оценки характеристик поперечного сечения корпуса крупнотоннажного контейнеровоза на ранних стадиях проектирования судовых корпусных конструкций // Морские интеллектуальные технологии, 2019. № 3(45). Т. 2. С. 87–92.
10. Faltinsen O.M. Challenges in Hydrodynamics of Ships and Ocean Structures. *Brodogradnja*. 2007;58(3). URL: <https://www.researchgate.net/publication/27201126> – 04.02.2023.
11. 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, 2018. P. 743–748. URL: <https://www.researchgate.net/publication/320307726> – 04.02.2023.
12. Leal M., Gordo J.M. Hull's manufacturing cost structure. *Brodogradnja*. 2017;68(3). <https://dx.doi.org/10.21278/brod68301>

13. Бугаев В.Г., До Т.М., Дам В.Т. Обеспечение вместимости, посадки и начальной остойчивости в задачах оптимизации судов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2019. № 4(41). С. 55–63. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2019-4-5>
14. Бугаев В.Г., Бондаренко Ю.В., Дам Ван Тунг, Ковалев А.А. Оптимизация конструкций корпуса судна с учетом их технологичности // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 1(54). С. 38–49. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-1/38-49>.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2023. N 4/57

Ship design and constructionwww.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/24-38>

Bugaev V., Dam Van Tung, Kitaev M., Novikov V.

VIKTOR G. BUGAEV, Doctor of Engineering Sciences, Professor, bugaev.vg@dvfu.ru
 MAKSIM V. KITAEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, kitaev.mv@dvfu.ru
 VALERY V. NOVIKOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
leka230243@gmail.com
Far Eastern Federal University
 Vladivostok, Russia
 DAM VAN TUNG, Candidate of Engineering Sciences, Lecturer, damvantung@mail.ru
 Faculty of Marine Engineering, Department of Industrial Engineering Management
Vietnam Maritime University
 Haiphong, Vietnam

To the optimization of the shape and structure of the ship's hull from the system standpoint

Abstract. A fairly simple and effective method of optimizing the shape and structure of the ship's hull from a system position, taking into account performance, longitudinal strength and torsion, is presented. Three inter-related tasks are formulated: the first is to optimize the shape of the hull in order to ensure performance according to the criterion of minimum resistance of water to the movement of the vessel and the requirements for the strength and manufacturability of structures; The second is arrangement of premises, placement of cargo and supplies to ensure the specified fit and stability, simulation of bending moments and shear forces in still water and in rough seas, determination of the stress-strain state of structures (based on an equivalent beam). Optimization of the hull shape and elements of the equivalent beam of the vessel are presented, which make it possible to identify the best design and structural solutions and assess the economic effect. Particular attention is paid to the trimming of the vessel, determination of stresses and displacements in the hull connections in still water, at the top and bottom of the wave (during deflection and bending of the vessel), on an oblique wave (during torsion).

Keywords: optimization, computer modeling, total strength, material consumption

For citation: 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;(4):24–38. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
 The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Bityukov M.A., Gerasimov K.D., Kirillov P.A., Mudrik P.S., Chistyakov R.S. Application of numerical methods for assessing the influence of the indirectness of the ship's hull on the value of wave loads. *Transactions of the Krylov State Research Center*. 2022;S1:98–101. (In Russ.). <https://www.doi.org/10.24937/2542-2324-2022-1-S-I-98-101>
2. Bugaev V.G., Dam Van Tung. Ensuring the strength of the hull of a fishing vessel. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2019;(2):49–56. (In Russ.). <https://www.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-6>

3. Bugaev V.G., Dam Van Tung, Bondarenko Yu.V. Optimization of the shape of the hull of fishing vessels. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2020;(2):35–45. (In Russ.). <https://www.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-4>
4. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Complex approach to topological and parametric optimization of ship constructions. *Transactions of the Krylov State Research Center*. 2020;(1):95–108. (In Russ.). <https://www.doi.org/10.24937/2542-2324-2020-1-391-95-108>
5. Pashin V.M. *Ships Optimization*. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1983. 296 p. (In Russ.).
6. 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*. 2020;(3-2):92–100. (In Russ.).
7. Damage and Computational Analysis of the Strength of Ship Structures: monograph / V.V. Novikov, G.P. Turmov, O.E. Surov, A.P. German, K.A. Molokov, M.V. Kitaev; Sci. Ed. by G.Y. Illarionov. Vladivostok, Far Eastern Federal University Publishing House, 2020. 266 p. (In Russ.).
8. Tryaskin V.N. Methodology of parametric design of ship hull constructions. *Transactions of the Krylov State Research Center*. 2018;(S2):9–14. (In Russ.). <https://www.doi.org/10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-9-14>
9. Tryaskin V.N., Yu Xinyan. Methodology for Assessing the Cross-Sectional Characteristics of the Hull of a Large-Capacity Container Ship at the Early Stages of Designing Ship Hull Structures. *Marine Intellectual Technologies*. 2020;(3-2):87–92. (In Russ.).
10. Faltinsen O.M. Challenges in Hydrodynamics of Ships and Ocean Structures. *Brodogradnja*. 2007;58(3). URL: <https://www.researchgate.net/publication/27201126> – 04.02.2023.
11. 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, 2018. P. 743–748. URL: <https://www.researchgate.net/publication/320307726> – 04.02.2023.
12. Leal M., Gordo J.M. Hull's manufacturing cost structure. *Brodogradnja*. 2017;68(3). <https://dx.doi.org/10.21278/brod68301>
13. Bugaev V., Do T.M., Dam V.T. Trim and draft, capacity and initial stability optimization solutions for the vessels. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2019;(4):55–63. (In Russ.). <https://www.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-4>
14. 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;(1):38–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-1/38-49>