Проектирование и конструкция судов

DOI: [https:// dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-6](https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-6)
УДК 629.128

В.Г. Бугаев, Дам Ван Тунг

БУГАЕВ ВИКТОР ГРИГОРЬЕВИЧ – д.т.н., профессор, ORCID 0000-0001-8778-620X,
e-mail: v_bugaev@mail.ru

ДАМ ВАН ТУНГ – аспирант, e-mail: damvantung@mail.ru

Кафедра кораблестроения и океанотехники Инженерной школы

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

Обеспечение прочности корпуса рыболовного судна

Аннотация: Адекватная оценка напряженно-деформированного состояния корпуса судна как сложной пространственной системы предполагает использование современных методов исследования, точного описания и закрепления конструкций, определения нагрузок в соответствии с требованиями Правил РМРС. Для оценки оптимальности конструкций корпуса применение экспериментальных и численных методов является чрезвычайно актуальным и удобным решением. Опыт показывает, что численные исследования имеют преимущества (по сравнению с экспериментальными) по срокам выполнения и стоимости. Цель данного исследования – определение напряженно-деформированного состояния и оптимизация конструкций корпуса (на примере охлаждаемого трюма) рыболовного судна с целью снижения его металлоёмкости и увеличения экономической эффективности. Представлены результаты оптимизации конструкций корпуса судна с помощью численных методов, которые позволяют определить не только наилучшие размеры связей корпуса с точки зрения минимума массы, но и оценить экономический эффект. Особое внимание уделяется исследованию зависимости напряжений, перемещений и массы от величины шпации, размеров шпангоутов и бимсов и толщины флоров с учетом требований Правил РМРС.

Ключевые слова: оптимизация конструкций корпуса, прочность корпуса судна, местная прочность.

Введение

Появление и внедрение автоматизированных систем в судостроительной области является одним из важных достижений в разработке методов решения задач инженерного и экономического анализа. Широкое распространение численные методы получили при решении задач гидродинамики судов и прочности судовых конструкций. Здесь можно отметить работы по оценке ходкости, местной прочности, прочности судов ледового плавания при ударе об лед [3–5]. При исследованиях прочности и жесткости днищевых перекрытий судов со значительной килеватостью с учетом влияния угла килеватости на изгиб перекрытия от поперечной нагрузки используются как традиционные, так и численные методы [6]. Численное моделирование позволяет оценить прочность отдельных конструкций или системы в целом, определить, какие элементы конструкции будут снижать эксплуатационную надежность изделия, и внести изменения для получения равнопрочной конструкции или системы, а также проводить опти-

мизацию конструкции по следующим критериям: минимум массы, максимум приращения прибыли и др. [7, 11].

Цель исследования – определение напряжено-деформированного состояния и оптимизация конструкций корпуса рыболовного судна (в данном случае – проекта 70133, предназначенного для Вьетнама) с целью снижения его металлоёмкости и увеличения экономической эффективности.

Прежде всего мы должны решить две задачи: 1) оптимизация конструкций корпуса судна по критерию минимума массы; 2) оптимизация конструкций корпуса судна по критерию максимального увеличения его эффективности по сравнению с верхним подуровнем его проектирования. Для их решения нам необходимо найти вектор X_k , определяющий топологию корпуса, размеры связей конструкций, при которых критерий эффективности достигает экстремального значения и выполняются требования, предъявляемые к прочности и элементам конструкций, а также к вместимости, остойчивости и др. [2, 7, 9].

Известными величинами являются элементы судна: архитектурно-конструктивного типа, общего расположения (количество и расположение продольных и поперечных переборок, палуб и др.) $X^* = (L, B, T, H, l_T, b_T, h_{дв})$ и двойственные оценки ограничений y_j , полученные на верхнем подуровне проектирования судна. Здесь l_T – длина отсека, м; b_T – расстояние от борта до ближайшей продольной переборки, м; $h_{дв}$ – высота двойного дна, м.

В качестве оптимизируемых переменных могут быть приняты:

a – шпация поперечного набора палубы, борта и днища (вертикального набора поперечных переборок), м;

s_1, s_2 – толщины палубной и бортовой обшивок, мм;

n_1, n_2 – размеры бимсов и шпангоутов (номер полособульба);

l_1, l_2 – пролеты бимсов и шпангоутов, м.

Величинами, функционально связанными с оптимизируемыми переменными, являются:

W – моменты сопротивления балок набора палубы и борта, см³;

s_3 – толщина флоров, мм.

Количество переменных в настоящем исследовании выбрано с учетом ресурсов вычислительной техники и гибкого управления моделью.

Критерий эффективности:

- Задача 1. Минимум массы корпуса судна:

$$f_k(X^*, X_k) \rightarrow \min M_k(X^*, a, n, l, s),$$

где $M_k(X^*, a, n, l, s, W)$ – масса конструкций корпуса в функции оптимизируемых a, n, l, s, W при найденных на верхнем подуровне главных размерениях и X_k судна X^* , т.

- Задача 2. Приращение критерия эффективности по судну, вызванное изменением нагрузки (масс), вместимости и координат центра тяжести (ЦТ) по отношению к рассчитанным в задаче определения элементов судна на верхнем подуровне, если таковые имеются

$$(X^*, X_k) \rightarrow \max \sum_{j=1}^m y_j \Delta \psi_{jk},$$

где y_j – оценки ограничений, руб./размерность ограничения;

$\Delta \psi_{1k}$ – приращение массы металлического корпуса;

$\Delta \psi_{2k}$ – приращение абсциссы ЦТ металлического корпуса;

$\Delta \psi_{3k}$ – приращение метacentрической высоты и т.д.

Оценки в задаче 2 определены на верхнем подуровне при оптимизации элементов судна и в нашем конкретном примере равны:

y_1 – приращение массы металлического корпуса (грузоподъемности) $y_1 = 50$ тыс. долл./т;

y_2 – приращение абсциссы ЦТ металлического корпуса $y_2 = 0$;

y_3 – приращение метacentрической высоты $y_3 = 0$.

То есть ограничения по абсциссе ЦТ и метацентрической высоте не являются лимитирующими.

Ограничения, определяющие область допустимых решений, могут быть построены на основе Правил Регистра или норм прочности [1, 8]:

a – шпация поперечного набора палубы, борта и днища лежит в пределах (п. 1.1.3), $a_1 \leq a(X_k) \leq a_2^*$;

s_1, s_2 – толщины палубной и бортовой обшивок не менее требуемых (1.6.4.4), $s(X_k) \geq s^*$;

l_1, l_2 – пролеты балок (определяются в функции размеров судна и количества продольных переборок), $l(X_k) \geq l^*$;

W – моменты сопротивления балок палубы и борта не менее требуемых, $W(X_k) \geq W^*$;

n_1, n_2 – размеры бимсов и шпангоутов (определяются с учетом пролета и момента сопротивления балок (1.6.4.1 – 1.6.4.2));

s_3 – толщина флоров не менее требуемой (п. 2.4.4.3), $s(X_k) \geq s^*$.

3D-модель конструкций корпуса

Судно имеет поперечную систему набора со шпацией 540 мм. Шпангоуты и бимсы изготовлены из полосульба. Продольные и поперечные переборки – сварные плоские, усиленные вертикальными ребрами жесткости. Три грузовых люка размером в свету 800x1200 мм установлены на верхней палубе для доступа в охлаждаемые танки. Углы вырезов закруглены в целях предотвращения концентрации напряжений. Между люками установлены две продольные переборки, подразделяющие трюм на три отсека. Конструкции корпуса изготовлены из судостроительной стали нормальной прочности категории А с гарантированным пределом текучести не менее 235 МПа в соответствии с ГОСТ 5521-86 [10].

Важным условием сходимости решения задачи является хорошее начальное приближение. В качестве начального приближения принята модель базового варианта судна, созданная с учетом его элементов $X^* = (L, B, T, H, l_T, b_T, h_{дв})$ и рекомендаций Правил РМРС. Отметим, что возможности вычислительной техники не позволяют в полной мере осуществить оптимизацию без некоторого упрощения условий задачи. На рис. 1 приведена 3D-модель конструкций корпуса судна в районе танков.

Рис. 1. 3D-модель конструкций корпуса судна в районе танков (здесь и далее – рисунки авторов).

В состав трехмерной модели включены поддерживающие конструкции для обеспечения по возможности реальной картины работы конструкций без упрощений и введения поправочных коэффициентов.

Требования к трехмерной модели конструкций корпуса:

- моделирование конструкций по заранее заданному макету общего расположения (компоновки) судна;
- минимально возможное количество оптимизируемых параметров для гибкого управления модификацией конструкций;
- модель должна быть параметризованной, позволять варьировать параметры конструкций корпуса в заданных пределах. При этом концепция конструкций корпуса должна сохранять принятое на верхнем подуровне решение.

Размеры начального варианта конструкций корпуса в таблице выделены желтым цветом.

Последовательность решения задачи. Этап 1 – оптимизация конструкций без вырезов грузовых люков. Этап 2 – проверка прочности конструкций с вырезами.

Нагрузка. Расчетное давление P , кПа, действующее на корпус судна со стороны моря, определяется по правилам Российского морского регистра судоходства (п. 1.3.2.1) [8].

Нагрузка, действующая на палубу, включает в себе поперечную равномерно распределенную нагрузку от веса находящегося на палубе груза (улова) и веса воды, попадающей на палубу во время шторма (13 кПа). Расчетное давление, обусловленное перемещениями корпуса относительно профиля волны для точек приложения нагрузок, расположенных выше и ниже ЛГВ, приведены на рис. 2.

Рис. 2. Схема приложения нагрузки.

Рис. 3. Начальные условия:
а – схема крепления конструкций; б – сетка в районе бортовой кницы.

Крепление. Конструкции корпуса судна созданы из отдельных, увязанных между собой перекрытий и узлов, обеспечивающих судну достаточную прочность, надежность и устойчивость под действием внешних нагрузок. Конструкции танков в районе днищевых перекрытия жестко заделаны, в районе палубы шарнирно закреплены с учетом симметричности конструкций относительно ДП (рис. 3,а).

Сетка. Важным этапом в анализе конструкций является создание сетки. От её параметров зависят качество и время исследования (рис. 3,б). В настоящем исследовании сетка создана на основе кривизны. Характеристики сетки: тип – на твердом теле; максимальный размер элемента – 78,67 мм; качество – высокое; всего узлов – 1453189; всего элементов – 756912.

Результаты исследований

Базовый вариант (начальное приближение). В результате исследования базового (начального) варианта определены напряжения, перемещения и деформации: максимальное напряжение – 209 МПа; максимальное перемещение – 0,0014 м; максимальная деформация – 0,00058. Расчетные напряжения не превышают допустимые пределы, что говорит о достаточной прочности конструкций, а масса конструкций трюма составляет 2х9862 кг.

Оптимизация. Размеры конструкций корпуса начального варианта в таблице выделены желтым цветом, оптимального варианта – зеленым цветом.

Размеры конструкций корпуса начального и оптимального вариантов

Обозначение	Наименование, размерность	Начальный вариант	Диапазон варьирования	Ограничения (требования Правил)	Оптимальный вариант
a	Шпация поперечного набора, мм	540	450, 540, 600	п. 1.1.3	540
s_1	Толщина палубной обшивки, мм	6 (7)	6, 7, 8	1.6.4.4	6
s_2	Толщина бортовой обшивки, мм	8 (7)	7, 8, 9	1.6.4.4	8
l_1	Пролет бимсов, м	2,2	2,2	-	2,2
l_2	Пролет шпангоутов, м	2,32	2,32	-	2,32
n_1	Бимс (полособульб)	10	9, 10, 12	1.6.4.1 – 1.6.4.2	9
n_2	Шпангоут (полособульб)	12	10, 12, 14	1.6.4.1 – 1.6.4.2	10
s_3	Толщина флоров, мм	7	6, 7, 8	п. 2.4.4.3	6
σ	Напряжения по Мизесу, МПа	209		<235	229
M	Масса, кг	9862		Минимизировать	9644

Ниже приведены: эпюра эквивалентных напряжений по Мизесу, возникающих в конструкциях трюма (рис. 4,а); графики зависимости напряжений и массы конструкций от шпации для начального и оптимального вариантов (рис. 4,б). Распределение напряжений вдоль бимса (ДП–борт) и по высоте шпангоута (днищевое перекрытие–палубное перекрытие) до и после оптимизации показано на рис. 5.

а

б

Рис. 4. Результаты оптимизации:
а – эпюра напряжений; б – зависимость напряжений и массы конструкций от шпации.

Рис. 5. Распределение напряжений (Шп. 29):
а – вдоль бимса; б – по высоте шпангоута.

Максимальные напряжения возникают в районах соединения бортового и палубного перекрытий и продольной переборки и палубы с помощью книц. Несмотря на обеспечение прочности конструкций в оптимальном варианте, напряжения в бортовой книце все-таки достигают высоких значений, близких к пределу текучести. С целью снижения напряжений книце придали незначительное скругление и приварили поясok (рис. 6,а).

Установка вырезов люков в палубе не привела к существенному изменению прочности и массы конструкций (рис. 6,б).

Рис. 6. Узловые напряжения оптимального варианта:
а – в бортовой книце со скруглением; б – в районе выреза.

Экономический эффект только от оптимизации конструкций танков достигается за счет уменьшения стоимости корпуса и увеличения грузоподъемности:

$$f_k(X^*, X_k) = f_k(X_k) + \sum_{j=1}^m y_j \Delta \psi_{jk} = f_k(X_k) + 50 * 0,436 = 21,8 \text{ тыс. долл.}$$

здесь $f_k(X_k)$ – доля прибыли (критерия), получаемая за счет снижения стоимости корпуса. Численное значение $f_k(X_k)$ определяется в процессе технико-экономического обоснования элементов судна.

Выводы

- Прочность конструкций корпуса обеспечена при воздействии нагрузок, регламентированных Правилами Российского морского регистра судоходства: максимальные напряжения при оптимальном варианте составляют 229 МПа в районе Шп. 29, что не превышает предельно

допустимых значений напряжений, равных 235 МПа; максимальные перемещения при оптимальном варианте составляют 1,68 мм в центре пластины в районе Шп. 21–22.

- Масса конструкции трюма до оптимизации составляла 2х9862 кг, после оптимизации – 2х9644 кг, т.е. произошло уменьшение массы на 2х218кг (2,2%).

Положение центра тяжести практически не изменилось, следовательно, посадка и остойчивость также не изменятся в результате оптимизации конструкций.

- Подкрепление вырезов и установка скругленной кницы привели к уменьшению максимальных напряжений с $\sigma_{\max} = 229$ МПа до $\sigma_{\max} = 179$ МПа, масса конструкций при этом практически не изменилась.

- Важным преимуществом конечно-элементного анализа является не только определение, анализ и оценка критерия эффективности и ограничений, но и визуализация результатов решения задачи в виде картин, графиков и эпюр.

- Наряду с оптимизацией конструкций корпуса можно решить частные задачи:

- влияние формы шпангоутов на вместимость и прочность конструкций;

- влияние толщины и размеров флоров на металлоёмкость и приращение координат центра тяжести и др.

Результаты исследований могут быть использованы при обеспечении прочности конструкций корпуса судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изменения к Правилам классификации и постройки морских судов. Применение в практике РС требований Финско-шведских правил для судов ледового плавания, 2010. Циркулярное письмо № 312-11-812ц от 15.04. 2015. 44 с.
2. Короткин Я.И., Ростовцев Д.М., Сиверс Н.Л. Прочность корабля. Л.: Судостроение, 1974. 432 с.
3. Лобанов В.А. Оценка местной ледовой прочности корпуса судна численными методами // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2010. № 3. URL: <http://diffjournal.spbu.ru/-pdf/lobanov4.pdf> (дата обращения: 20.01.2019).
4. Лобанов В.А. Численная оценка ледовых качеств судна. Прочность // Вестник научно-технического развития. 2011. № 12. URL: <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=563> (дата обращения: 20.01.2019).
5. Лобанов В.А. Численная оценка ледовых качеств судна. Ходкость // Вестник научно-технического развития. 2012. № 1(53). URL: <http://www.vntr.ru/nomera/2012-153/> (дата обращения: 22.01.2019).
6. Манухин В.А. О расчетах прочности и жесткости днищевое перекрытия с килеватостью. Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1, № 2(40). С. 57–61.
7. Пашин В.М. Оптимизация судов. Л.: Судостроение, 1983. 296 с.
8. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. Ч. 2. СПб., 2016. 224 с.
9. Раков А.И. Оптимизация основных характеристик и элементов промысловых судов. Л.: Судостроение, 1978. 232 с.
10. Рыболовное судно проекта 70133, Poseidon-Zvezda Co., Ltd, Vladivostok.
11. Bugaev V.G., Dam Van Tung, Domashevskaya Ya.R. Research the strength of the decking overlap of the fishing vessel for Vietnam. Proceedings of the Intern. conf. on advances in computational mechanics. Series Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2017, pp. 701–707. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-7149-2_48; <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?author-Id=-57201007287> – 19.12.2018.

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-6>

BugaeV V., Dam Van Tung.

VICTOR BUGAEV, Doctor of Engineering Sciences, Professor, ORCID 0000-0001-8778-620X, e-mail: v_bugaev@mail.ruDAM VAN TUNG, Postgraduate Student, e-mail: damvantung@mail.ru

Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, School of Engineering

Far Eastern Federal University

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

Ensuring the strength of the fishing vessel hull

Abstract: Adequate estimation of the stress-strain state of the ship's hull as a complex spatial system requires using of modern research methods, accurate description and fixing of structures, and determination of loads in accordance with the requirements of the rules of RMRS (The Russian Maritime Register of Shipping). To assess the optimality of the hull structures, the application of experimental and numerical methods is an extremely relevant and convenient solution. Experience shows that numerical studies, in comparison with experimental ones, have advantages in terms of realization and cost. The purpose of the study is to determine the stress-strain state and the optimization of hull structures (using the example of refrigerated hold) of the fishing vessel in order to reduce its metal consumption and increase economic efficiency. The article presents the results of optimizing the hull structure of the fishing vessel by using numerical methods that allow determining not only the best dimensions of members of ship's hull in terms of minimum mass, but also to estimate the economic effect. Special attention is paid to the study of the dependence of stresses, displacements and masses on the value of the spacing, the size of the frames and beams and the thickness of the floor, taking into account the requirements of the rules of RMRS.

Keywords: optimization of hull structures, hull strength of the ship, local strength.

REFERENCES

1. Changes to the Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Application in RS practice of the requirements of the Finnish-Swedish regulations for ice-swimming vessels, 2010. Circular letter N 312-11-812ts from 15.04.2015. 44 p.
2. Korotkin Ya.I., Rostovtsev D.M., Sievers N.L. The strength of the ship. Leningrad, Shipbuilding, 1974, 432 p.
3. Lobanov V.A. Evaluation of local ice strength of the hull of the vessel by numerical methods // Differential equations and control processes. 2010;3. URL: <http://diffjournal.spbu.ru/pdf/lobanov4.pdf> . – 20.01.2019.
4. Lobanov V.A. Numerical evaluation of the vessel's ice qualities. Durability. Bulletin of Scientific and Technical Development. 2011;12. URL: <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=563>. – 20.01.2019.
5. Lobanov V.A. Numerical evaluation of the vessel's ice qualities. Traffic performance. Bulletin of Scientific and Technical Development. 2012;1. URL: <http://www.vntr.ru/nomera/2012-153/> – 22.01.2019.
6. Manuhin V.A. On the calculations of the strength and rigidity of the bottom overlap with deadrise. Marine Intellectual Technology. 2018(1);2:57–61.
7. Pashin V.M. Optimization of ships. Leningrad: Shipbuilding, 1983, 296 p.
8. Rules for the classification and construction of ships. Russian Maritime Register of Shipping. Part 2. St. Petersburg, 2016. 224 p.
9. Rakov A.I. Optimization of the main characteristics and elements of fishing vessels. Leningrad: Shipbuilding, 1978, 232 p.
10. Fishing vessel project 70133, Poseidon-Zvezda Co., Ltd, Vladivostok.
11. Bugaev V.G., Dam Van Tung, Domashevskaya Ya.R. Research the strength of the decking overlap of the fishing vessel for Vietnam. Proceedings of the Intern. conf. on advances in computational mechanics. Series Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2017, pp. 701–707. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-7149-2_48; <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57-201007287> – 19.12.2018.