

УДК 629.5.01
DOI: 10.37890/jwt.vi83.589

Исследование математической модели оптимизации характеристик контейнерного судна

Ю.П. Буров

ORCID: 0009-0000-8837-7993

Ю.А. Кочнев

ORCID: 0000-0002-6864-4473

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Проектирование современного морского судна неразрывно связано с созданием его «электронной копии», реализуемой в виде математической модели. При этом, она содержит в себе не просто минимально необходимые для дальнейших расчетов формулы, зависимости и переменные, но и обеспечивает целостность, объективность и всесторонность данных об исследуемом объекте в некоторой области поиска решения. В совокупности с применяемым алгоритмом оптимизации, за который в настоящей работе выбран метод случайного поиска, реализована система расчета характеристик контейнерного судна с оптимизацией по заданному критерию эффективности в виде приведенных затрат. В статье приведены результаты расчёта характеристик фидерного контейнерного судна, выполненный в разработанной программе оптимизации, и анализ свойств математической модели на основе данных численных экспериментов, позволяющих оценить ее адекватность, чувствительность и устойчивость. Сравнение полученных результатов с реально существующими контейнерными судами позволило исследовать поведение математической модели в области наивысшей точности, и обосновать отклонения полученных оптимальных экспериментальных данных по заданным определяющим переменным от сравниваемого проекта судна.

Ключевые слова: математическая модель, контейнерное судно, оптимизация, алгоритм случайного поиска, адекватность, критерий эффективности, компьютерные эксперименты.

Study of a mathematical model for optimizing a container ship characteristics

Yuri P. Burov

ORCID: 0009-0000-8837-7993

Yuri A. Kochnev

ORCID: 0000-0002-6864-4473

Volga State University of Water Transport

Abstract. The design of a modern marine vessel is inextricably linked with the creation of its "electronic copy", implemented in the form of a mathematical model. At the same time, it contains not only the formulas, dependencies and variables that are minimally necessary for further calculations, but also ensures the integrity, objectivity and comprehensiveness of data about the object under study in some area of the search for a solution. In conjunction with the optimization algorithm used, for which the random search method is selected in this paper, a system for calculating the characteristics of a container ship is implemented with optimization according to a given efficiency criterion in the form of reduced costs. The article presents the results of calculating the characteristics of a feeder container vessel, performed in the developed optimization program, and analyzing the properties of a mathematical model based on numerical experimental data to assess its adequacy, sensitivity, and stability. A comparison of the results obtained with actual container ships made it

possible to investigate the behavior of the mathematical model in the field of the highest accuracy, and to justify the deviations of the optimal experimental data obtained for the specified defining variables from the compared vessel design.

Keywords: mathematical model, container ship, optimization, random search algorithm, adequacy, efficiency criteria, computer experiments.

Введение

В процессе создания такой сложной системы как «судно» накапливается масса информации, которая требует строгого упорядочивания и ясного отображения. В связи с этим в судостроении получил широкое распространение метод математического моделирования. Позволяя избежать больших затрат временных, финансовых и других видов ресурсов, имея способность адаптироваться к поставленным условиям, независимость от внешних факторов, наличие в своем составе унифицированного критерия эффективности сделали данный метод на сегодняшний день практически незаменимым.

Однако, какими бы убедительными не были выводы теоретических утверждений, только подкрепленные практикой факты могут служить основанием для серьезных выводов. Для определения свойств математической модели, в качестве постоптимизационного анализа необходим цикл компьютерных экспериментов, позволяющих оценить ее адекватность. Их результаты могут быть впоследствии подкреплены и натурными испытаниями судна, причем такие испытания могут входить и в требования классификационных обществ по отдельным мореходным качествам, как приведено в [1].

Материалы и методы

Контейнерное судно – судно, предназначенное для перевозки грузов в контейнерах международного образца и имеющее ячеистые направляющие конструкции в трюмах [2]. Этот тип судов является одним из самых динамично развивающихся в условиях современного рынка морских перевозок. Показательной статистикой в этом вопросе является динамика развития мировой морской контейнерной торговли, изображенная на рис 1, где желтым цветом изображен оборот торговли по морским путям Тихого океана, синим – Атлантического, а голубым – маршрут Европа-Азия. Численность двадцатифутовых контейнеров (далее «TEU» - twenty-foot equivalent unit, англ.), задействованных на рынке морских перевозок, с 1995 по 2017 год выросла в 2.33, 5.75 и 3.25 раз соответственно.

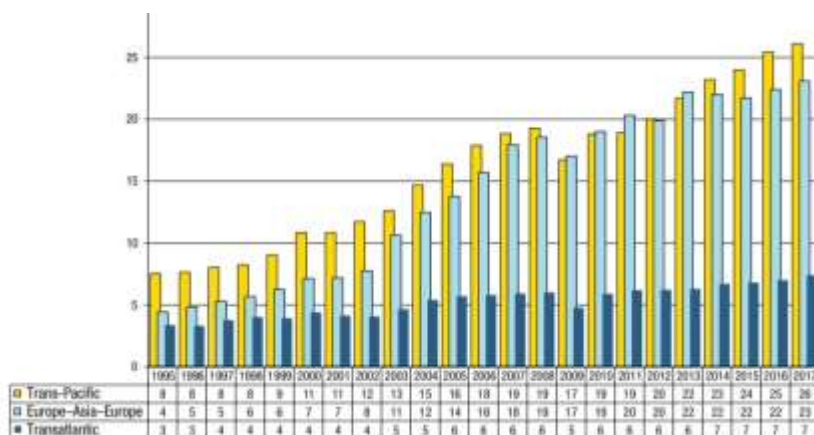


Рис. 1. Показатели оборота мировой морской торговли (млн. TEU) [3]

Разработанная математическая модель состоит из восьми подсистем, реализующих математическое описание взаимосвязи между главными неизвестными судна, прогнозирование ходкости, генерации теоретического чертежа, расчёта нагрузки масс, обеспечения непотопляемости, контейнеровместимости, остойчивость, и анализа экономических показателей. Реализация перечисленных подсистем выполнена на основе рекомендации [4, 5].

В совокупности с алгоритмом оптимизации методом случайного поиска система, реализованная с помощью программного комплекса «Архелон», проводит расчет характеристик контейнерного судна на основе вводимых исходных данных. Подробно изложенный принцип работы описан в источнике [6].

На сегодня известны и широко применяются различные методы оптимизации системы [7], применяемые в том числе для достижения необходимой эффективности. Используемый в настоящем исследовании способ оптимизации известен как алгоритм оптимизации методом случайного поиска (АСП) [8] с управлением выбора переменных в зависимости от нарушенных ограничений, получивший свое распространение в последние годы в связи с развитием мощностей вычислительной техники. Данный вид алгоритма оптимизации имеет явное преимущество – возможность работы с дискретными и непрерывными переменными. В исследуемой математической модели применено 5 оптимизируемых переменных: объемное водоизмещение V , длина между перпендикулярами L_{pp} , количество контейнеров в одном ярусе $n_{кр}$, число ярусов контейнеров в трюме $n_{ку}$ и коэффициент общей полноты судна δ .

Результаты

Каждая математическая модель проверена на адекватность при различных назначенных условиях. Один из самых распространенных способов проверки адекватности построенной математической модели – сравнение с существующим судном [9]. В качестве исходных данных для оценки адекватности принято судно проекта PW700. Это одновинтовое контейнерное судно с кормовым расположением машинного отделения, оборудованное главным двигателем общей проектной мощностью 7200 кВт, основные характеристики которого приведены в Таблице 1, а общий вид изображен на рис 2.

Таблица 1

Характеристики судна проекта PW700

№	Название	Переменная	Единицы	Значение
0	Водоизмещение судна	V	m^3	12153
1	Длина между перпендикулярами	L_{pp}	м	126.8
3	Количество контейнеров в одном ярусе	$n_{кр}$	TEU	6
4	Число ярусов контейнеров в трюме	$n_{ку}$	TEU	3
5	Коэффициент общей полноты судна	δ	---	0.671
6	Расчетная скорость	v_0	уз.	17
7	Заданная контейнеровместимость	ZADK	TEU	682
8	Количество ярусов палубных контейнеров	NPLA	TEU	5

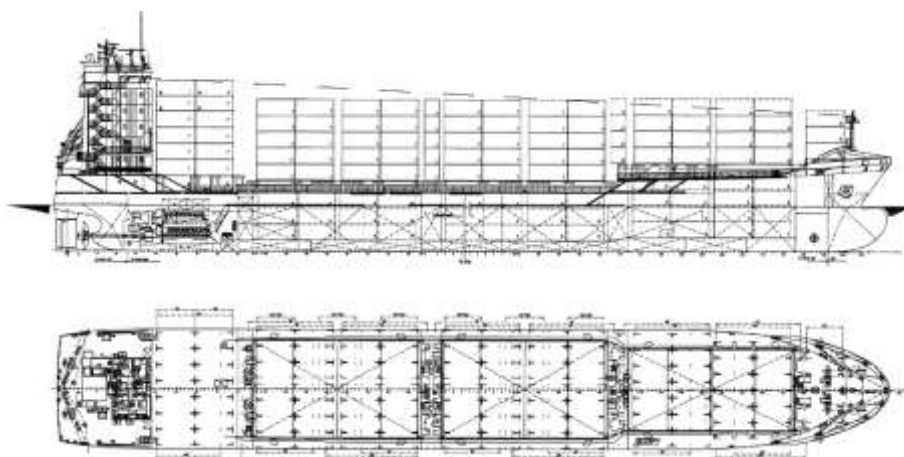


Рис. 2. Общий вид контейнерного судна проекта PW700

Здесь и далее контейнеровместимость судна и другие подобные параметры указываются в TEU – стандартных 20-ти футовых контейнерах в соответствии с ISO 668:1995[10].

В исследуемой математической модели в качестве критерия эффективности выбран показатель минимальной стоимости постройки и эксплуатации судна с заданным количеством перевозимых контейнеров. Выбор данного типа критерия обусловлен в первую очередь типом судна. Контейнеровозы – суда изначально проектирующиеся и строящиеся для достижения максимальной прибыли путем транспортировки заданного количества груза в контейнерах, соответственно, чем большую прибыль способно приносить судно, тем более представленный проект будет привлекателен для Заказчика и шансы на его воплощение в жизнь возрастут. Данный тип критерия относится к минимизируемому типу и не является единственно возможным, так распространено и применение максимизируемого типа критерия как в [11].

Как видно из представленных в Таблице 2 результатов судно прошло проверку всеми наложенными ограничениями системы и стало успешным вариантом в первом же цикле расчета. То есть система не обратилась к генерации нового значения переменных, однако, показала адекватность реализованной математической модели с точки зрения расчета в ней реально существующего судна.

Таблица 2

Результаты расчета

№	Переменная	Единицы	PW700	Модель	Δ , %
0	L_{pp}	м	126.8	126.8	0
1	H	м	9.47	9.47	0
2	B	м	19.4	19.4	0
3	T	м	7.36	7.36	0
5	DW	т	8505	8505	0
6	V	м ³	12153	12153	0
7	P_S	кВт	7200	7200	0
8	N_{PER}	шт	5	5	0
9	KNPL	TEU	485	485	0
10	KNTR	TEU	204	204	0
11	KONV	TEU	682	682	0

Для нахождения оптимального варианта необходимо провести оптимизационный цикл, варьируя значения исследуемых переменных. Для этого проведен расчет судна типа проекта PW700 в программно-методическом комплексе «Архелон», заданы параметры оптимизации, которые выбираются исходя из технического задания, математической применимости формул или назначаются Проектантом, опираясь на имеющийся опыт разработки аналогичных судов: численный диапазон, в котором варьируется значение оптимизируемой переменной, количество дискретных и непрерывных оптимизируемых переменных, количество циклов оптимизации.

В Таблице 3 приведены диапазоны изменения основных параметров оптимизации в виде непрерывных величин. При этом, такие параметры как количество контейнеров в одном ярусе и количество ярусов контейнеров являются дискретными и не задаются. Как видно из представленных данных система позволяет задать количество ограничений, диапазон минимального и максимального значения оптимизируемых переменных (длина судна между перпендикулярами, водоизмещение, коэффициент общей полноты), количество дискретных и непрерывных переменных, количество циклов оптимизации. Изменение этих параметров может потребоваться, для расширения области поиска оптимальных значений переменной (например, ограничение длины судна для возможности эксплуатации на заданных маршрутных линиях), увеличения циклов расчетов для уточнения оптимального варианта системы и в других подобных случаях.

Таблица 3

Параметры оптимизации

Параметр	Переменная	Единицы	Значение
Число ограничений	NOGN	---	6
Мин. значение L_{pp}	L_{ppMIN}	м	70
Макс. значение L_{pp}	L_{ppMAX}	м	300
Мин. значение V	V_{MIN}	м ³	1000
Макс. значение V	V_{MAX}	м ³	100000
Мин. значение δ	δ_{min}	---	0.550
Макс. значение δ	δ_{max}	---	0.725
Число непр. перем.	NX	---	3
Число дискр. перем.	NJ	---	2
Число циклов	MKRT	---	44000

Для определения точности проведенной оптимизации, необходимо повторение эксперимента и оценка полученных результатов. Итоги расчетов приведены в Таблице 4.

Таблица 4

Результаты оптимизации

Переменная	Ед.	PW700	M1	M2	M3	M_{cp}	$\Delta, \%$
V	м ³	12153	11767	11865	11871	11834	-2.32
L_{pp}	м	126.8	130.6	131.1	131.1	130.9	+3.4
δ	---	0.671	0.620	0.621	0.621	0.621	-7.45
n_{kr}	TEU	6	6	6	6	6	0
n_{kv}	TEU	3	3	3	3	3	0
DW	т	8505	8280	8325	8331	8312	-2.04
KNPL	TEU	485	539	545	545	543	+12.37
P_s	кВт	7200	6676	6743	6753	6724	-6.20
KONV	TEU	682	727	741	743	737	+7.83
N_{PER}	шт.	5	6	6	6	6	+20
Z_{OPT}	$\$ \cdot 10^8$	3.400	3.125	3.117	3.106	3.119	-8.26

Столбцы Таблицы 4 «M1», «M2», «M3» соответствуют итогам проведения оптимизации и расчета для судна в результате трех различных процессов оптимизации по 44000 циклов каждый. Небольшой разброс между значениями моделей позволяет сделать выводы о достаточности построения трех моделей и расчета среднего значения для общего анализа адекватности системы по текущему судну. «M_{ср}» – среднее значение переменных по построенным моделям и, наконец, «Δ» – отклонение значений построенной математической модели от реального судна. Данные последнего столбца Таблицы 4 наглядно демонстрируют наличие лишь небольших «местных» отклонений в характеристиках системы. Полученное новое судно имеет меньшее водоизмещение, коэффициент полноты и, как следствие, меньшую требуемую мощность энергетической установки P_S, что в конечном итоге снижает затраты на перевозку груза и улучшает значение критерия, сохраняя обязательные условия существования системы – требуемую контейнероёмкость, величину метацентрической высоты, и т.д.. Снижение мощности объясняется применением методики расчета ходкости судна и параметров гребного винта, использованной при проведении модельных испытаниях серии быстроходных судов SSPA (Швеция, 1969) [12]. Модели судов, выбранных для проведения данных испытаний, обладают высокой для грузового судна скоростью в диапазоне от 12 до 22 узлов, имеют небольшой коэффициент полноты 0.525-0.75 и обводы быстроходного судна.

Для возможности оценки полученных результатов, важным является выбор количества циклов оптимизации. Результаты компьютерного эксперимента с увеличенным циклом оптимизации представлены в Таблице 5.

Таблица 5 содержит столбец – «M₈₈», в котором отображаются результаты расчетов при 88000 циклов оптимизации, а Δ – отклонения относительно вычислений при количестве циклов равном 44000. Значения Δ не превышают 0.5 %, что говорит о небольших изменениях в характеристиках системы. Новый вариант судна не имеет существенных отличий, следовательно, можно утверждать, что выбранное количество циклов оптимизации является достаточным для решения поставленной задачи.

Таблица 5

Результаты оптимизации с увеличенным кол-вом циклов

Переменная	Единицы	PW700	M ₄₄	M ₈₈	Δ, %
V	м ³	12153	11767.9	11777.3	+0.08
L _{pp}	м	126.8	130.62	131.18	+0.43
δ	---	0.671	0.620	0.618	-0.31
n _{кр}	TEU	6	6	6	0
n _{кв}	TEU	3	3	3	0
DW	т	8505	8280	8282	-0.02
KNPL	TEU	485	539	539	0
P _S	кВт	7200	6369	6367	-0.23
KONV	TEU	689	727	727	0
N _{PER}	шт.	5	6	6	0

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют свою общую адекватность. Однако, они относятся к начальному этапу проектирования – этапу первого приближения, когда количество неизвестных переменных очень велико. Итоги исследования показали:

1) незначительно изменились значения V и LPP – увеличились длина и водоизмещение судна, соответственно, возросла стоимость постройки судна, однако такое влияние оказалось не столь значительное, поскольку не помешало получить на выходе оптимальное значение минимизируемого критерия;

2) δ – алгоритм оптимизации уменьшил значение коэффициента полноты судна. Если судно удовлетворяет всем ограничениям, то в остальном принцип оптимизации сводится к максимально возможному уменьшению главных размерений судна при сохранении заданной контейнеровместимости, что позволит уменьшить стоимость постройки и эксплуатации судна, а значит улучшить значение критерия.

3) pk_g – число контейнеров в поперечном ряду судна получилось по значению идентичным судну проекта PW700. Данная переменная тесно связана с общей шириной судна, уменьшение которой ведет к уменьшению требуемой мощности энергетической установки, однако, такие преобразования ведут к ухудшению остойчивости. Таким образом, варианты с меньшей шириной судна в своем большинстве не прошли проверку системой по минимальной величине метацентрической высоты и были отсеяны алгоритмом.

4) pk_y – количество ярусов контейнеров в трюме не претерпело изменений в ходе расчетов. Такой результат объясняется ограничением высоты минимального надводного борта, величину которого реальные суда имеют уже максимально приближенной к оптимальной. Увеличение же количества контейнеров в трюме все так же повлечет удорожание постройки и эксплуатации судна, что, в конечном итоге, ухудшило бы значение критерия эффективности.

5) DW – наряду с заданной контейнеровместимостью, дедейт один из важнейших экономических и технических показателей эффективности судна. Изменения в диапазоне приблизительно 2%, можно считать малым и не влияющим на результаты исследования, принимая во внимание начальную стадию проектирования судна

6) $KNPL$ – количество палубных контейнеров отличается в значительной степени демонстрируя прирост более чем в 12%. Алгоритм оптимизации при расчете данного показателя стремится разместить как можно большего числа контейнеров на открытой палубе, для уменьшения высоты борта и улучшения значения критерия. Очевидно, что ограничением в таком случае для системы будет выступать необходимость обеспечения достаточной остойчивости для судна.

7) Ps – система смогла уменьшить требуемую мощность ЭУ судна, а значит уменьшить стоимость постройки и эксплуатации и улучшить значение критерия. Наряду с увеличением длины судна и уменьшением коэффициента общей полноты, уменьшение требуемой мощности – характерно для заданной математической модели ввиду применения для расчетов ходкости исходные данные ранее упомянутых быстроходных судов серии SSPA. В совокупности такое преобразование в значительной степени позволяет улучшить значение критерия эффективности.

8) $KONV$ – контейнеровместимость судна увеличена системой более чем на 7%, при этом, соблюдено условие минимальной контейнеровместимости. Задача алгоритма оптимизации состояла не в увеличении контейнеровместимости судна, а в улучшении значения критерия, однако система параллельно смогла еще и увеличить контейнеровместимость, что характеризует полученные результаты с положительной стороны.

9) $NPER$ – расстановка водонепроницаемых поперечных переборок – один из сложнейших вопросов проектирования судна. Как видно из анализа данных, оптимизированная система имеет большее количество переборок, по сравнению с судном проекта PW700 (на 1 поперечную переборку у полученной модели больше), что является мерой обеспечения минимальной непотопляемости на текущем начальном этапе проектирования судна. В последствии $NPER$ может уменьшиться за счет конструкторских решений на дальнейших этапах проектирования.

10) $ZOPT$ – стоимость постройки и эксплуатации судна, оптимизируемый критерий эффективности системы, в рассчитанном варианте судна улучшился (уменьшился) на 8.26%. Принимая во внимание, что речь идет о десятках млн. долларов, подобный процент не кажется малым, а сам факт возможности

спроектировать и построить более эффективное судна всегда будет являться очень привлекательным для Заказчика.

В процессе создания судна, при более подробных расчетах, могут быть уточнены характеристики судна, при этом зачастую такие уточнения не лучшим образом сказываются на эффективности всей системы.

Настоящее исследование является комплексным, имеет большое количество направлений развития. Одним из таких направлений, ввиду вышеуказанных проблем, может являться ужесточение системы ограничений или усложнение математической модели. Данные процессы позволят получить более полное представление о будущем судне, сделать систему более устойчивой к внешним колебаниям, предложить новые возможности по улучшению значения критерия эффективности.

Заключение

Математическая модель тесно связана с алгоритмом оптимизации. Она рассчитывает характеристики проектируемого судна на основе исходных данных, заданных Заказчиком, а алгоритм оптимизации «организует построение такого вариантного ряда, который приводит к оптимальному решению [13]».

Проведенный анализ демонстрирует эффективность реализуемой математической модели и алгоритма оптимизации. Адекватность полученных сведений наглядно продемонстрирована на основе предложенных компьютерных экспериментов. С помощью проведенных расчетов достигнуто улучшения значения критерия эффективности системы, что делает их актуальными уже на самом начальном этапе проектирования судна. Также с положительными результатами проведен сравнительный анализ адекватности системы. Такие вычисления являются очень важными и для самого Проектанта, ведь появляется возможность предоставить Заказчику более эффективный вариант судна, и тем самым заинтересовать его именно этим проектом.

Предложенное направление оптимизации судна не является единственно верным и зависит исключительно от поставленной задачи.

Список литературы

1. Правила классификации и постройки высокоскоростных судов. СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 2018. 104 с.
2. Правила классификации и постройки морских судов, Часть I. СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 2019. 7 с.
3. Изменения в международной морской торговле // Обзор морского транспорта – 2017. - URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2017ch1_en.pdf. (дата обращения: 19.01.2025).
4. Гайкович А. И. Проектирование контейнерных судов. Учебное пособие. Л.: изд. ЛКИ, 1984. 27 с.
5. Рюмин С. Н. Курсовое и дипломное проектирование с использованием УИ САПР "Флот". Учебное пособие. СПб: изд. ГМТУ, 2005. 5 с.
6. Буров Ю. П. Оптимизация характеристик контейнерного судна с учетом прогнозируемой цены его постройки и эксплуатации // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №48. С. 76.
7. Пашин В. М. Оптимизация судов. Л.: Судостроение, 1983. 8 с.
8. Гайкович А. И. Основы теории проектирования сложных технических систем. СПб.: Моринтех, 2001. 277 с.
9. Рюмин С. Н. Состав и средства создания базовой информационной модели для система автоматизированного проектирования крупнотоннажных судов // Научно-технический сборник РС. 2014. № 37. С. 76.
10. ISO 668:2020 - Series 1 freight containers — Classification, dimensions and ratings //ISO: 2020. - URL: <https://www.iso.org/standard/76912.html> (дата обращения: 19.01.2025)

11. Гайкович А. И. Проектирование корабля с учетом процессов разрушения и восстановления // Научно-технический сборник Российского Морского Регистра Судоходства. 2015. №40/41. С. 31.
12. А. Вильямс SSPA серия испытаний сопротивления грузовых судов. Швеция.: 1969. 81 с.
13. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих судов, Том II. СПб.: Моринтех, 2014. 749 с.

References

1. Rules for the Classification and Construction of High-Speed craft. SPb.: Russian Maritime Register of shipping, 2018. 104 p.
2. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, Part I. SPb.: Russian Maritime Register of shipping, 2019. 7 p.
3. Developments in international seaborne trade // Review of maritime transport – 2017. - URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2017ch1_en.pdf. (accessed: 19.01.2025).
4. Gaikovich A. I. Design of container ships. Training manual. L.: publ. LSI, 1984. 27 p.
5. Ryumin S. N. Course and diploma design using the AI CAD "Fleet". The training manual. SPb: publ. SMTU, 2005. 5 p.
6. Burov Y. P. Optimization of the characteristics of a container vessel, taking into account the projected cost of its construction and operation // Marine intelligent technologies. 2020. №48. P. 76.
7. Pashin V. M. Optimization of ships. L.: Sudostroenie, 1983. 8 p.
8. Gaikovich A. I. Fundamentals of the theory of designing complex technical systems. St. Petersburg: Morintech, 2001. 277 p.
9. Ryumin S. N. Composition and means of creating a basic information model for a computer-aided design system for large-tonnage vessels // Scientific and Technical collection RS. 2014. № 37. 76 p.
10. ISO 668:2020 - Series 1 freight containers — Classification, dimensions and ratings //ISO: 2020. - URL: <https://www.iso.org/standard/76912.html> (accessed: 19.01.2025)
11. Gaikovich A. I. Ship design taking into account the processes of destruction and restoration // Scientific and technical collection of the Russian Maritime Register of Shipping. 2015. №40/41. 31 p.
12. A. Williams The SSPA cargo liner series resistance, Statens skeppsvarningsant. Sweden.: 1969. 81 p.
13. Gaikovich A.I. Theory of design of displacement vessels, Volume II. SPb: Morintech, 2014. 749 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTORS

Буров Юрий Павлович, соискатель кафедры Проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: burovyury@yandex.ru

Yuri P. Burov, applicant, Department of Design and Technology of Construction and Ships, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

Кочнев Юрий Александрович, д.т.н., доцент, профессор кафедры Проектирования и технологии постройки и судов, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: tmnkoch@mail.ru

Yuri A. Kochnev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Design and Technology of Construction and Ships, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

Статья поступила в редакцию 04.03.2025; опубликована онлайн 20.06.2025.
Received 04.03.2025; published online 20.06.2025.