

УДК 629.123

DOI: 10.37890/jwt.vi73.277

Анализ влияния условий эксплуатации на проектные характеристики балкеров

М.В. Китаев

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5345-6333>

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Аннотация. В статье приводятся результаты сравнительной оценки проектных характеристик судов, осуществляющих в настоящее время перевозки угля морем из портов Дальнего востока в страны АТР, с проектными характеристиками, полученными в результате математического моделирования и оптимизации последних по экономическим критериям. Оценена эффективность и целесообразность использования судов на рассматриваемых направлениях перевозок. Приведены результаты анализа влияния условий эксплуатации на оптимальные значения основных проектных характеристик (скорость и грузоподъемность) и экономические показатели функциональной эффективности судов рассматриваемого типа. Для определения оптимальных значений проектных характеристик балкеров использовалась математическая модель, включающая основные расчеты по теории корабля и проектированию судов, выполняемые на начальных стадиях проектирования. Расчеты выполнены для условий работы специализированного терминала с высокотехнологичной перевалкой угля и расположенного на юге Приморского края. Проанализированы внешние факторы, в наибольшей степени влияющие на экономическую эффективность перевозок и установлены диапазоны их изменения. Результаты работы могут использоваться на начальных этапах проектирования при обосновании основных проектных характеристик балкеров, а также при закреплении судов-претендентов за альтернативными направлениями перевозок.

Ключевые слова: балкер, перевалка угля, экономическая эффективность, проектные характеристики, математическая модель.

Analysis of the impact of operation conditions on the bulk carriers design characteristics

Maksim V. Kitaev

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5345-6333>

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract. The paper presents the results of a comparative analysis of the design characteristics of ships currently used for coal transporting from the ports of Far East of Russia to the Asia-Pacific countries with mathematical modeling and optimization results oriented to the economic criteria. The effectiveness and expediency of using ships in the certain directions of coal transportation is considered. The results of the analysis of the influence of operating conditions to the optimal values of the design characteristics (speed and payload capacity) and economic criteria of the functional efficiency of bulk carriers are given. The mathematical model for optimal values of the design characteristics of bulk carriers was used. The model takes into an account basic calculations of ship design and theory disciplines which are used at the initial stages of design. The calculations were made for the operating conditions of a specialized high-tech coal transshipment terminal with is located in the south part of Primorsky Krai.

The economic efficiency affecting factors and their variations ranges were analysed. The research results can be used at the preliminary stages of ship design for general characteristics calculation and transportation costs optimization.

Keywords: bulk carrier, coal transportation, economic efficiency, design characteristics, mathematical model.

Введение

Продолжительность проектирования и постройки судов в РФ составляет от 2 до 5 лет и более. Как правило, суда проектируются для заданных условий эксплуатации с учетом анализа текущих и прогноза будущих значений внешних факторов, влияющих на их эффективность. В то же время внутренние и внешнеэкономические условия, влияющие на эффективность судов в эксплуатации, характеризуются высокой степенью динамичности и несмотря на прогнозные оценки к моменту сдачи судна могут существенно от них отличаться [1]. Для оценки эффективности и целесообразности использования судов с конкретными проектными характеристиками на заданных линиях перевозок, а также с целью определения оптимальных значений основных проектных характеристик судов для заданных условий эксплуатации необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ условий эксплуатации судов на заданных линиях;
- разработать математическую модель для определения характеристик судна;
- определить оптимальные сочетания значений проектных характеристик для заданных условий эксплуатации;
- оценить влияние исходных данных, характеризующих условия эксплуатации на значения основных проектных характеристик и экономическую эффективность.

С целью оценки достоверности результатов и адекватности математической модели исходные данные для анализа и расчетов приняты на примере условий работы специализированного терминала по перевалке угля АО «Восточный Порт». Это позволит проанализировать динамику и условия эксплуатации судов, сравнить результаты математического моделирования и оптимизации (оптимальные сочетания значений проектных характеристик), с характеристиками реальных судов, осуществляющих в настоящее время перевозки угля морем в страны АТР.

Анализ условий эксплуатации судов

Специализированный терминал по перевалке угля АО «Восточный Порт» (далее – Порт), расположен в ДВФО (г. Находка, бухта Врангель). Порт специализируется на грейферной перевалке угля, добываемого в Кузбассе (см. рис. 1) [2].



Рис.1. Угольный терминал порта
(Фото пресс-службы АО «Восточный Порт»)

По официальным данным, в 2021 году Портом обработано 529 крупнотоннажных судов, из которых 30 балкеров типа «Capesize» (дедвейт более 150 тыс. т.) и 294 судна типа «Panamax» (дедвейт от 60 до 80 тыс. т.). Динамика грузооборота показана в табл. 1 [2].

Таблица 1

Показатели работы Порта

Год	1998	2003	2008	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Перевалка угля, млн. т.	5,5	11,8	14,4	17,7	21,8	22,8	23,5	23,2	24,3	25,5	26,85	26,57

Основными грузополучателями угольной продукции Порта являются: Япония, Китай, Тайвань, Республика Корея, Вьетнам, Индия, Малайзия, Индонезия, Филиппины, Таиланд и др. страны Азиатско-тихоокеанского региона. Распределение объемов доставки (угольной продукции), отгружаемого Портом, по странам АТР за 2021 год показано на рис. 2 [3].

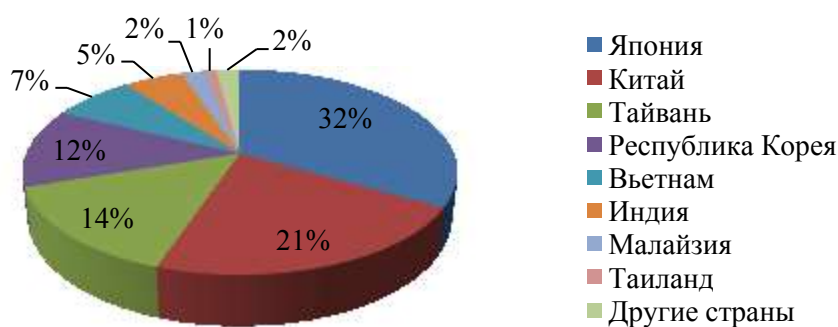


Рис.2. Распределение объемов доставки угольной продукции по странам АТР

В табл. 2 приведены средние значения протяженности линий морских перевозок (R) для основных потребителей угольной продукции Порта.

Таблица 2

Протяженность линии перевозок

Направление перевозок/ расстояние	Тайвань	Южная Корея	Китай	Малайзия	Индия	Пакистан	Таиланд	Вьетнам	Шри-Ланка	Индонезия	Филиппины	Япония
	R, миль	1594	669	1150	4017	6424	7012	4000	2891	5344	3348	2096

Гавань Порта незамерзающая, глубины на фарватере достигают 22 метров, что позволяет обслуживать крупнотоннажные суда и работать на перспективу. К причалам Порта могут швартоваться суда с разрешенной осадкой до 16,0 м (см. табл. 3) [4].

Таблица 3

Характеристика причалов Порта

№ причала	Специализация	Длина, м.	Глубина, м.	Осадка судов, м.	Эксплуатирующая организация
<i>Универсальный производственно-перегрузочный комплекс (ППК-1)</i>					
11	Генеральные грузы, Навалочные грузы	190,0	11,5	11,0	АО "Восточный порт"
12		190,0	11,5	11,0	
13		200,0	12,7	12,2	
14		200,0	12,7	12,2	
<i>Угольный комплекс (ППК-3)</i>					
49	Уголь	381,4	16,5	16,0	АО "Восточный порт"
50		381,4	16,5	16,0	

Порт оснащен судопогрузочными машинами производительностью до 3500 тонн и 3800 тонн угля в час, в том числе машинами, оснащенными специальной системой очистки угля перед погрузкой на судно с помощью магнитных барабанов. Общая производительность судопогрузочных машин Порта достигает 18 тыс. тонн угля в час [2].

Значения фрахтовых ставок для основных направлений перевозки угля в страны АТР приведены в табл. 4 для судов двух типов Panamax и Handymax соответственно [5, 6].

Таблица 4

Ставки фрахта на перевозку угля в долл./т

Год	2019		2020	2021
	Panamax	Handymax	Handymax	Handymax
Тип судна	долл./т.	долл./т.	долл./т.	долл./т.
Направление перевозок	долл./т.	долл./т.	долл./т.	долл./т.
Восточный (Россия) – Южная Корея	4-5	-	-	-
Восточный (Россия) - Япония	4,5-5	-	-	-
Восточный (Россия) – Тайван (Китай)	4-5	-	-	-
Ванино (Россия) - Шанхай (Китай)	-	10-11	6-12	12-23
Находка (Россия) - Далянь (Китай)	-	6-7	-	-
Ванино (Россия) - Далянь (Китай)	-	13-14	12-14	14-26

Современные балкеры оснащаются двигателями, способными работать на дизельном топливе и мазуте. Наиболее востребованными сортами бункеровочного топлива являются мазуты IFO180, IFO380 (Intermediate Fuel Oil), дизельное топливо MDO (Marine Diesel Oil) с содержанием серы 0,5-2,0% и газойль MGO (Marine Gas Oil) с содержанием серы до 0,5% или 0,1%. MGO в основном используют для прохода через зоны контроля выбросов.

Анализ цен на топливо в портах АТР говорит об их ежегодном росте и динамичности. Максимального значения цены на топливо достигают к концу года (см. табл. 5) [7].

Таблица 5

Динамика цен на бункеровочное топливо в долл./т.

Порт	IFO 380				MGO			
	298	273	490	748	657	460	770	1270
Находка	06.12.2019	08.12.2020	08.12.2021	07.03.2022	02.12.2019	02.12.2020	13.12.2021	08.03.2022
	-	-	-	-	701	466	763	1261
Далянь	-	-	-	-	02.12.2019	09.12.2020	06.12.2021	08.03.2022
	338	341	480	662	673	458	766	1201
Шанхай	02.12.2019	02.12.2020	03.12.2021	07.03.2022	20.12.2019	17.12.2020	08.12.2021	07.03.2022
	281	340	535	839	441	545	859	1067
Осака	10.12.2019	01.12.2020	06.12.2021	09.03.2022	29.08.2019	07.01.2021	06.12.2021	09.03.2022
	403,00	339,00	500,00	823,00	683	438	720	1310
Гаосюн	20.12.2019	08.12.2020	06.12.2021	09.03.2022	05.12.2019	01.12.2020	02.12.2021	09.03.2022
	420	347	499,5	776	664	445	667	1419
Ичхон	17.12.2019	01.12.2020	06.12.2021	09.03.2022	02.12.2019	04.12.2020	08.12.2021	09.03.2022

Анализ условий эксплуатации судов позволяет сформировать вектор исходных данных для дальнейшего использования этих величин в математической модели для поиска оптимальных сочетаний значений проектных характеристик судов.

Описание математической модели

Математические модели широко используются на начальных стадиях проектирования судов для анализа альтернативных вариантов решений. С позиций системного подхода модель оптимизации проектных характеристик, использованная в настоящем исследовании (см. рис. 3), относится к нижнему уровню внешней задачи проектирования судов [8], а зависимости, составляющие ее основу, являются нелинейными. Модель, реализована в виде программы для ЭВМ и отличается от аналогичных [1, 9, 10] тем, что является усовершенствованной в частях касающихся расчетов главных размерений, сопротивления движению, характеристик гребного винта и выбора главного двигателя, оценки строительной стоимости и критериев экономической эффективности. Так, для расчета главных размерений использованы формулы, полученные в результате обработки данных современных судов-прототипов; сопротивление воды рассчитывалось по методике [11], доработанной в части расчетов сопротивления трения, выступающих частей и аэродинамической составляющей; гидродинамические характеристики гребных винтов [12] определялись по специально полученным для коэффициента K_{DT} (диаметр-упор) полиномам. Кроме того, при решении оптимизационной задачи учитывались требования к остойчивости, прочности и допустимой осадке по условию захода в порт погрузки/разгрузки приведенные в [10]. Оценка показателей функциональной эффективности производилась по результатам работы судна за год.

К числу исходных данных относятся – тип двигателя, число лопастей винта, ставки портовых сборов и заработной платы экипажа, характеристики ветра и волнения и др.

Варьируемые параметры – протяженность линии, цена топлива, нормы грузообработки.

Оптимизируемые переменные - скорость V_s и грузоподъемность P_g .

Ограничения – допустимая осадка, момент в миделевом сечении, диапазоны изменения метацентрической высоты и периода бортовой качки, числа Фруда, коэффициента общей полноты, а также отношений главных размерений.

Требования к переменным – диапазоны изменения оптимизируемых переменных V_s и P_g .



Рис.3. Блок-схема модели оптимизации характеристик балкера

Для расчета главных размерений и коэффициентов полнот корпуса судна в модели использовались формулы, полученные в результате обработки данных судов-прототипов (данные для анализа взяты из регистрационной книги ABS - American Bureau of Shipping):

- длина габаритная (наибольшая теоретическая):

$$L_{нб} = 8,752DW^{0,288}; \tag{1}$$

- длина расчетная:

$$L = 1,003L_{нб} - 7,498; \tag{2}$$

- ширина габаритная:

$$B = 1,290DW^{0,293}; \quad (3)$$

- высота борта:

$$H = 0,575DW^{0,311} \quad (4)$$

- осадка расчетная:

$$T = 0,526DW^{0,286}; \quad (5)$$

- коэффициент общей полноты:

$$C_b = 0,87 \cdot 10^{-6} DW + 0,78; \quad (6)$$

- коэффициент полноты мидель-шпангоута [10]:

$$C_m = 1,012 C_b^{1/12} - 0,005; \quad (7)$$

- коэффициент полноты конструктивной ватерлинии (КВЛ) [10]:

$$C_{wp} = 1,015 C_b^{2/3}. \quad (8)$$

Водоизмещение судна порожнем вычислялось по формуле:

$$D_0 = P_s + P_o + P_m, \quad (9)$$

где P_s – масса корпуса и корпусных конструкций; P_o – масса оборудования корпуса; P_m – масса энергетической установки.

Слагаемые в выражении (9) рассчитываются по формулам, полученным в результате анализа данных судов прототипов [10]:

$$P_o = L^{0,8} B^{0,6} H^{0,3} C_b^{0,1}, \quad (10)$$

$$P_m = 0,17 N^{0,9}, \quad (11)$$

$$P_s = 0,034 L^{1,7} B^{0,7} H^{0,4} C_b^{0,5}. \quad (12)$$

Дедвейт рассчитывается по формуле:

$$DW = P_g + P_{fl} + P_{cr} + P_b, \quad (13)$$

где P_g – полезная грузоподъемность; P_{fl} – масса топлива; P_{cr} – масса экипажа с провизией и багажом; P_b – балласт.

Для расчета полного сопротивления воды движению судна использован метод, обобщающий результаты модельных и натурных испытаний транспортных судов различных типов (в основном зарубежной постройки) [11]:

$$R = C \frac{\rho V^2}{2} S, \quad (14)$$

где C – коэффициент полного сопротивления; ρ – массовая плотность морской воды; S – площадь смоченной поверхности; V – скорость хода судна.

Коэффициент полного сопротивления определяется по формуле:

$$C = C_f (1 + k) + C_w + C_{rh} + C_{app} + C_{air}, \quad (15)$$

где C_f – коэффициент сопротивления трения; k – форм-фактор (учитывает сопротивление формы); C_w – коэффициент волнового сопротивления; C_{rh} – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости обшивки; C_{app} – коэффициент,

учитывающий сопротивление выступающих частей корпуса судна; C_{air} – коэффициент сопротивления воздуха.

Гидродинамические характеристики гребного винта определялись по полиномам, полученным в результате обработки кривых (серия В [12]) коэффициента K_{DT} (диаметр-упор). В проектировочных расчетах диаметр гребного винта принимался максимальным по условию его размещения в кормовом подзоре корпуса судна, а число лопастей учитывалось поправочным коэффициентом. Формулы для расчета относительной поступи J , шагового отношения P/D и коэффициента полезного действия гребного винта (КПД) η_0 следующие:

$$J_0 = -0,0548 K_{DT}^2 + 0,5598 K_{DT} - 0,015, \tag{16}$$

$$P/D = 0,0417 K_{DT}^3 - 0,2481 K_{DT}^2 + 0,7064 K_{DT} + 0,449, \tag{17}$$

$$\eta_0 = 0,0444 K_{DT}^3 - 0,3008 K_{DT}^2 + 0,7708 K_{DT} + 0,011. \tag{18}$$

$$N = \frac{RV}{\eta_p \eta_s \eta_r}, \tag{19}$$

где V - скорость хода; R - сопротивление воды движению судна; η_p – пропульсивный КПД; η_p - КПД передачи; η_r - КПД редуктора.

Водоизмещение судна рассчитывалось по формуле:

$$D = D_0 + DW. \tag{20}$$

Алгоритм расчета водоизмещения и составляющих нагрузки представлен на рис. 4 и основан на итерационной процедуре, связанной с подбором искомого параметра в рассматриваемом выражении, в качестве которого выступает DW судна. Вычисления выполняются до тех пор, пока расчетное значение грузоподъемности судна P_{gc} не будет равно заданному (проектному) значению.

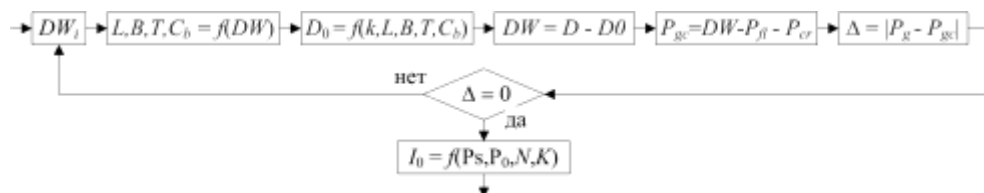


Рис.4. Алгоритм расчета водоизмещения и составляющих нагрузки

Время, затрачиваемое на проведение погрузочно-разгрузочных работ, рассчитывается:

$$T_{pr} = 2 ((P_g/q_{lu}) + t_a) \tag{21}$$

где q_{lu} – нормы выполнения погрузочно-разгрузочных работ; t_a – вспомогательное время.

Количество рейсов, совершаемых судном в течение года:

$$n_{rt} = T_{yr} / (T_r + T_{pr}) \tag{22}$$

где T_{yr} - период навигации судна с учетом простоев; T_r – время кругового рейса; T_{pr} – время нахождения судна в портах погрузки / разгрузки.

Годовой грузооборот судна вычисляется по формуле:

$$Q = P_g n_{rt}. \tag{23}$$

Строительная стоимость рассматриваемого судна определяется по формуле [10]:

$$I_0 = K_1 K_2 (2000 P_s^{0,85} + 3500 P_0 + 2400 N^{0,8}). \quad (24)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий интерес судостроительной верфи; K_2 – коэффициент, учитывающий количество судов в серии (серийность судов).

Суммарные эксплуатационные годовые расходы вычисляются по формуле [10]:

$$C_A = C_c + C_r + C_v, \quad (25)$$

где C_c – отчисления на административные нужды; C_r – годовые расходы, связанные с техническим обслуживанием и эксплуатацией судна; C_v – текущие рейсовые расходы.

Для оценки эффективности судов в рассматриваемой модели использовались интегральные показатели, широко применяемые в отечественных и зарубежных исследованиях при выполнении технико-экономических обоснований [1, 10, 13 - 17].

Транспортные издержки (Transportation cost):

$$TRC = \frac{C_A}{Q}. \quad (26)$$

Требуемая фрахтовая ставка (Required Freight Rate):

$$RFR = \frac{(CR)I_0 + C_A}{Q}. \quad (27)$$

Чистый приведенный доход (Net Present Value):

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{A'}{(1+i)^t} - I_0, \quad (28)$$

где i_d – коэффициент дисконтирования; N – нормативный срок службы судна; A' – доход после уплаты налога [14].

Результаты вычислений

Представленная выше математическая модель позволяет выполнить сопоставление проектных характеристик судов, осуществляющих в настоящее время перевозки угля морем из АО «Восточный Порт» в страны АТР, с оптимальными значениями характеристик, полученных в результате моделирования и оптимизации, а также оценить влияние условий эксплуатации на оптимальные значения характеристик (скорость и грузоподъемность) и экономические показатели, характеризующие функциональную эффективность судов.

Для иллюстрации влияния целевой направленности принятого в расчетах критерия на значения оптимальных проектных характеристик в настоящем исследовании использовались как минимизируемый (TRC), так и максимизируемый (NPV) показатели сравнительной экономической эффективности [14, 15].

В качестве примера, на рис. 5 показаны результаты расчетов, выполненных для критерия TRC. При этом были приняты следующие диапазоны изменения основных параметров, характеризующих внешние условия эксплуатации судов:

- протяженность линии эксплуатации: 500, 1250, 2500, 3750 и 5000 миль (см. рис. 5 а);
- производительность судопогрузочных машин: 3500, 7000 и 10500 т/час (см. рис. 5 б);

– стоимость бункеровочного топлива: 200, 500 и 1000 долл./т (см. рис. 5 в).

На приведенных графиках поверхности расположены в порядке возрастания указанных выше параметров (снизу вверх), характеризующих условия эксплуатации судов.

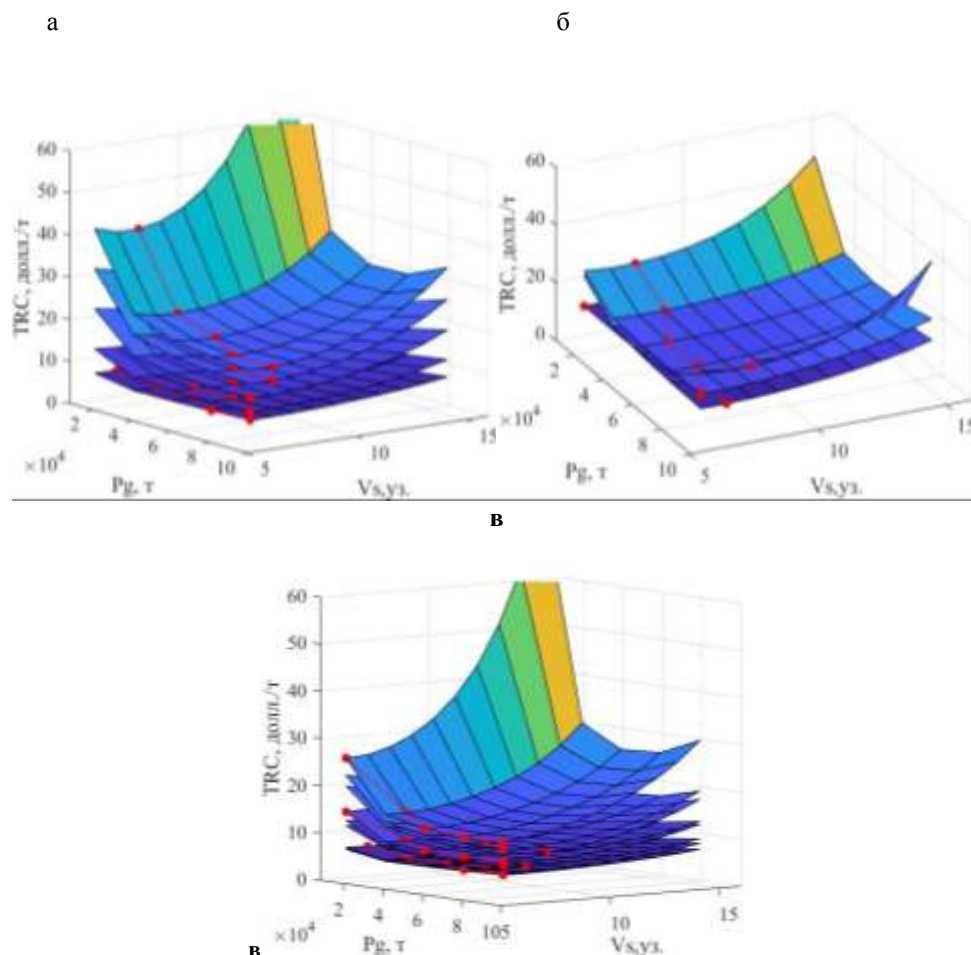


Рис. 5. Влияние параметров модели из числа исходных данных на критерий TRC:
 а - протяженности линии; б - производительность судопогрузочных машин;
 в – стоимость бункеровочного топлива

На рис. 5а линии, соответствующие оптимальным значениям скорости хода (экономически эффективной по критерию TRC), отмечены на графиках красным цветом. Таким образом, анализ вышеприведенных графических зависимостей позволяет определить оптимальные значения критерия TRC и скорости хода при заданной грузоподъемности судна. Результаты приведены в табл. 6 – 8.

Таблица 6

Зависимость скорости хода от грузоподъемности и протяженности линии

R, миль	500		1250		2500		3750		5000	
Pg, т	TRC, долл.	Vs, уз.	TRC, долл.	Vs, уз.	TRC, долл.	Vs, уз.	TRC, долл.	Vs, уз.	TRC, долл.	Vs, уз.
10000	6,57	7,00	12,04	7,00	21,10	6,00	30,17	7,00	39,24	8,00

30000	5,08	8,00	7,87	8,00	12,52	8,00	17,19	8,00	21,87	8,00
50000	5,20	7,00	7,48	7,00	11,22	8,00	14,98	8,00	18,74	8,00
70000	5,48	6,00	7,52	7,00	10,90	8,00	14,29	7,00	17,70	7,00
90000	5,80	6,00	7,77	6,00	11,06	7,00	14,32	7,00	17,60	7,00

Таблица 7

Зависимость скорости хода от грузоподъемности и производительности судопогрузочных машин

$q_{из}$, т/час	3500		7000		10500	
P_g , т	TRC, долл.	V_s , уз.	TRC, долл.	V_s , уз.	TRC, долл.	V_s , уз.
10000	22,43	7,00	11,06	6,00	20,66	8,00
30000	14,69	8,00	10,90	7,00	11,80	8,00
50000	14,04	7,00	11,22	8,00	10,28	8,00
70000	14,20	7,00	12,52	8,00	9,80	7,00
90000	14,76	6,00	21,10	7,00	9,80	7,00

Таблица 8

Зависимость скорости хода от грузоподъемности и стоимости топлива

$f_{пр}$, долл./т	200		500		1000	
P_g , т	TRC, долл.	V_s , уз.	TRC, долл.	V_s , уз.	TRC, долл.	V_s , уз.
10000	10,07	9,00	12,04	7,00	14,25	6,00
30000	6,95	10,00	7,87	8,00	8,98	7,00
50000	6,75	9,00	7,48	7,00	8,32	6,00
70000	6,89	8,00	7,52	7,00	8,27	6,00
90000	7,18	7,00	7,77	6,00	8,55	6,00

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

- увеличение протяженности линии приводит к увеличению оптимальной скорости хода судна по критерию TRC;
- линиям с протяженностью до 1000 миль соответствуют меньшие значения скоростей хода во всем просматриваемом диапазоне грузоподъемностей;
- судам грузоподъемностью до 70000 т соответствуют большие значения скоростей хода оптимальных по критерию TRC;
- с увеличением грузоподъемности судна значения TRC уменьшаются и разница тем больше, чем больше грузоподъемность и протяженность линии;
- увеличение производительности судопогрузочных машин порта приводит к снижению простоев судна и уменьшению TRC. С увеличением грузоподъемности этот эффект более заметен;
- для заданных значений производительности судопогрузочных машин порта и протяженности линии всегда можно определить вариант судна (оптимальный по грузоподъемности) и являющийся наиболее эффективным с позиций критерия TRC;

- повышение стоимости бункеровочного топлива приводит к увеличению значений TRC и снижению оптимальной скорости хода. Более коротким линиям соответствуют меньшие значения скоростей хода при равной стоимости топлива;
- для заданных значений стоимости топлива, производительности судопогрузочных машин и протяженности линии всегда можно определить оптимальный по грузоподъемности и скорости хода судна вариант с позиций критерия TRC (причем скорость хода такого судна не всегда принимает минимальные значения);
- для перевозок угля в страны АТР, наиболее подходящими по критерию TRC, являются суда грузоподъемностью 70 ÷ 80 тыс. тонн и оптимальной (экономичной) скоростью хода порядка 7,0 узлов.
- В табл. 9, 10 по аналогии с вышеприведенными представлены результаты вычислений для критерия NPV, а на рис. 6, 7 для прочих показателей экономической эффективности.

Таблица 9

Зависимость скорости хода от грузоподъемности и фрахтовой ставки

P_g , т	RFR, долл./т	14	16	18	20
10000	Vs, уз.	8,00	9,00	9,00	9,00
	NPV, млн. долл.	0,28	2,86	5,6	8,35
30000	Vs, уз.	10,00	10,00	11,00	11,00
	NPV, млн. долл.	11,35	17,5	23,65	29,95
50000	Vs, уз.	9,00	10,00	10,00	10,00
	NPV, млн. долл.	14,35	21,77	29,4	37,02
70000	Vs, уз.	8,00	9,00	9,00	9,00
	NPV, млн. долл.	14,24	22,39	30,73	39,06
90000	Vs, уз.	7,00	8,00	8,00	9,00
	NPV, млн. долл.	12,61	21,14	29,87	38,42

В табл. 9 результаты получены при фиксированных значениях протяженности линии, производительности судопогрузочных машин, стоимости топлива ($R = 1000$ миль, $f_{pg} = 500$ долл./т и $q_{lu} = 7000$ т/час, $N = 24$ года, $ip = 0,12$ и $id = 0,15$). Для каждого значения грузоподъемности изменялась фрахтовая ставка.

В результате расчетов установлено, что с увеличением значений фрахтовой ставки оптимальная (с точки зрения критерия NPV) скорость хода судна увеличивается (\approx на 1 узел), а зависимость между критериями NPV от RFR - линейная. Оптимальные значения скоростей хода судов грузоподъемностью от 50000 т и более на 1,0 – 2,0 узла меньше, чем у судов грузоподъемностью до 50000 т.

В табл. 10 приведены результаты оптимизации характеристик судна по критерию NPV. Расчеты выполнены для следующих исходных данных: $R = 1000$ миль, $f_{pg} = 800$ долл./т и $q_{lu} = 7000$ т/час, $RFR = 12 \div 20$ долл./т. На рис. 6 а показан пример оптимизации характеристик судна по критерию NPV для $RFR = 12$ долл./т.

Таблица 10

Зависимость проектных характеристик судна от RFR

RFR, долл./т	12	14	16	18	20	22
V_s , уз.	7,50	8,00	8,00	8,00	8,50	8,50
P_g , т	50000	60000	65000	75000	75000	80000

На рис. 6 б, в показаны примеры оптимизации характеристик по критериям TRC и RFR, при следующих значениях $R = 1000$ миль, $f_{pr} = 800$ долл./т и $q_{lu} = 7000$ т/час.

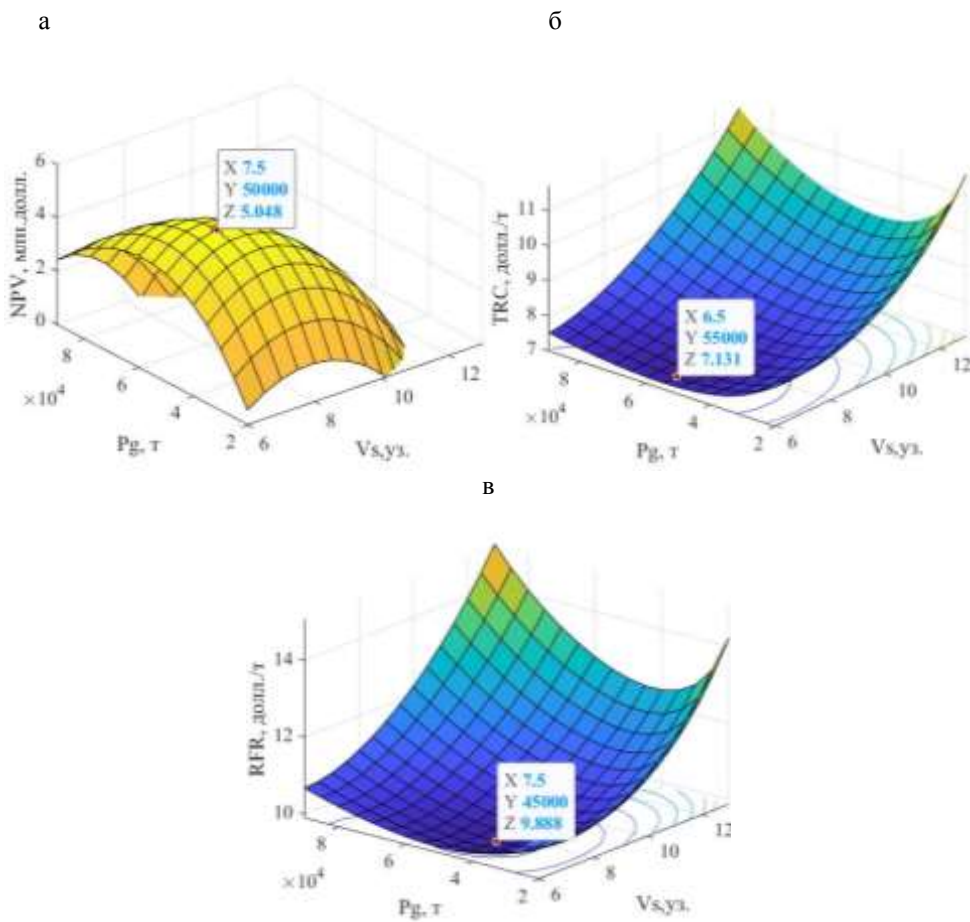


Рис. 6. Результаты оптимизации характеристик судна по критериям:
а – чистый приведенный доход; б – транспортные расходы; в – требуемая фрахтовая ставка

На рис. 7 показаны примеры оптимизации характеристик балкеров по критериям А (годовой доход [14]) и CF (прибыль до уплаты налога [15]). Исходных данные в этом расчете приняты, как и в предыдущем примере (рис. 6), а значение RFR = 10 и 12 долл./т.

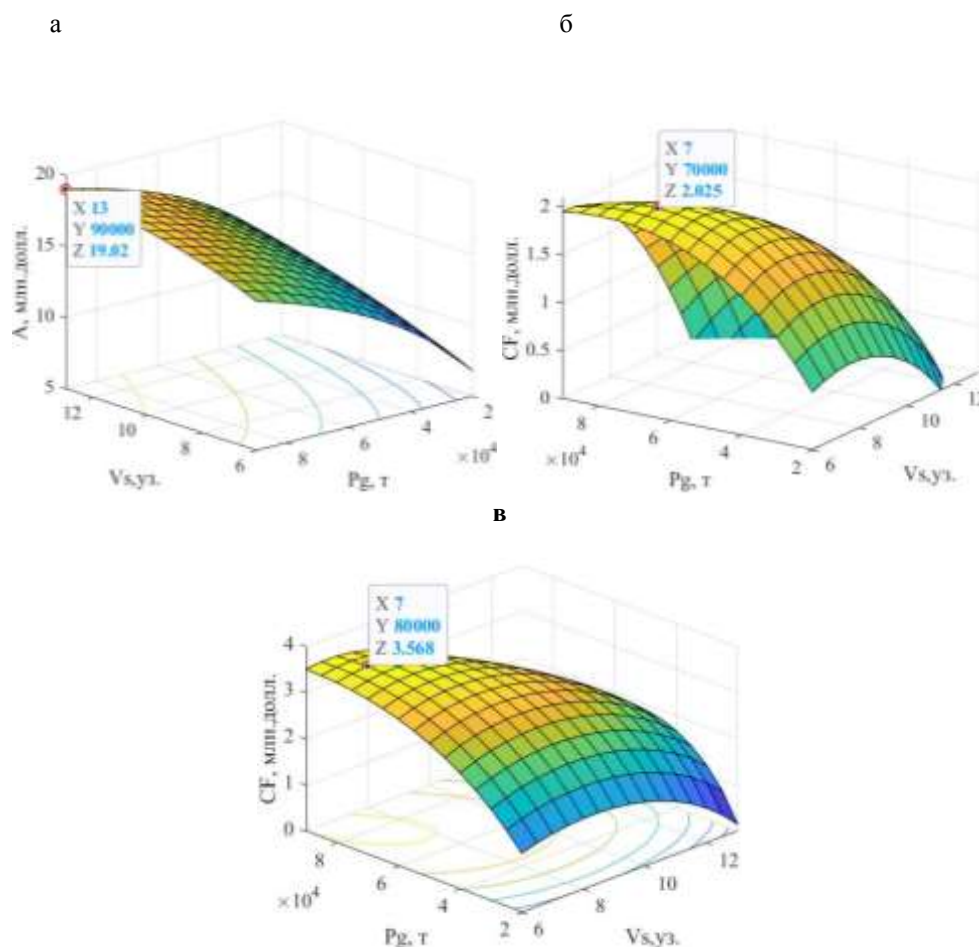


Рис. 7. Результаты оптимизации характеристик судна по критериям:
 а – валовый годовой доход; б – прибыль до уплаты налога (RFR = 10 долл./т);
 в – прибыль до уплаты налога (RFR = 12 долл./т)

Из анализа данных, приведенных на рис. 7, следует, что при максимизации валового годового дохода получается наибольшее (по грузоподъемности) судно с максимальной скоростью. При оптимизации по критерию CF результаты зависят от величины RFR.

В качестве примера результаты оптимизации характеристик судна по критерию «фактор возврата капитала» (CR1) для трех значений RFR представлены на рис. 8.

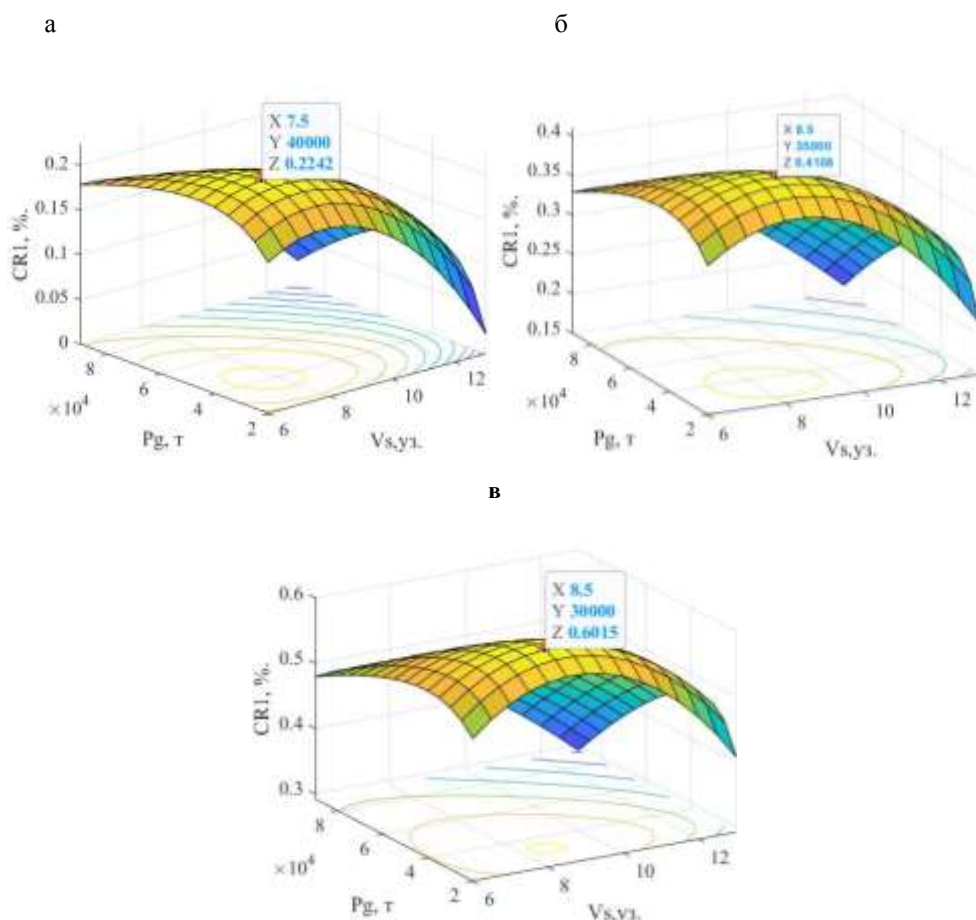


Рис. 8. Результаты оптимизации характеристик судна по критерию фактор возврата капитала:
 а – RFR = 12 долл./т; б – RFR = 16 долл./т; в – RFR = 20 долл./т

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

- повышение стоимости топлива приводит к уменьшению значения NPV и оптимальной (экономически эффективной) скорости хода;
- с повышением фрахтовой ставки наблюдается рост оптимальных значений грузоподъемности и скорости хода;
- оптимальная скорость хода судна при изменении протяженности линии в два и более раза уменьшается на 1,0 – 2,0 узла;
- диапазон оптимальных (экономически эффективных) скоростей хода судов, осуществляющих перевозки угля с страны АТР, лежит в диапазоне 7,0 ÷ 11,0 уз.
- установлено, что при текущих (на момент написания статьи) значениях фрахтовых ставок (14 – 22 долл./т) перевозку угля из п. Восточный в страны АТР целесообразно осуществлять судами грузоподъемностью 60 ÷ 75 тыс. тонн, что соответствует дедейтеу порядка 60 ÷ 80 тыс. тонн. Предельная осадка таких судов (при полной загрузке) 12 ÷ 14 метров, что в полной мере согласуется с

глубинами акватории Порта и проектными характеристиками судов, осуществляющих перевозки в настоящее время.

Заключение

В статье представлены результаты сопоставления проектных характеристик балкеров, осуществляющих перевозки угля из портов Дальнего востока в страны АТР, с проектными характеристиками, полученными в результате математического моделирования и оптимизации последних по экономическим критериям. Для этого разработана математическая модель оптимизации проектных характеристик балкеров. Все расчеты выполнены с привязкой к реальным условиям работы угольного терминала порта Восточный, что позволило сопоставить результаты вычислений с реальными данными. Результаты в полной мере согласуются с характеристиками судов, осуществляющих перевозки угля морем в настоящее время.

Приведены результаты анализа влияния факторов, характеризующих условия эксплуатации (протяженность линии, стоимость топлива, нормы грузообработки, фрахтовая ставка), на оптимальные значения основных проектных характеристик (скорость и грузоподъемность) и экономические показатели функционирования судов рассматриваемого типа.

Оценена эффективность и целесообразность (с учетом особенностей акватории порта) использования судов с определенными характеристиками на рассматриваемых направлениях перевозок.

Результаты исследования могут использоваться на начальных этапах проектирования при обосновании проектных характеристик балкеров, а также при закреплении судов-претендентов за альтернативными направлениями перевозок.

Список литературы

1. Yang, Y., A study on the preliminary ship design method using deterministic approach and probabilistic approach including hull form / Y. Yang, C. Park, K. Lee, J.C. Suh // Journal Structural and Multidisciplinary Optimization – 2007. 33 (6). Pp. 529-539. <https://doi.org/10.1007/s00158-006-0063-5>.
2. Официальный сайт АО "Восточный Порт". [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.vostport.ru> (дата обращения: 25.03.2022).
3. Сетевое издание PRIMPRESS. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://primpress.ru/article/79986> (дата обращения: 25.03.2022).
4. Информационно-аналитическое агентство «ПортНьюс» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://portnews.ru/news/273629/> (дата обращения: 25.03.2022).
5. Официальный сайт Компании ООО «Уголь Инвест» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://coalinvest.ru/stavki-frahta-na-perevozki-uglya-t/> (дата обращения: 25.03.2022).
6. Состояние и динамика цен на угольную продукцию. Ежемесячный информационный бюллетень. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.rosugol.ru> (дата обращения: 25.03.2022).
7. Информационно-аналитическое агентство Oil Monster. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.oilmonster.com/bunker-fuel-prices> (дата обращения: 25.03.2022).
8. Вашедченко А.Н. Автоматизированное проектирование судов. Учебное пособие. - Л.: Судостроение, 1985. - 164 с.
9. Papanikolaou A. Ship Design - Methodologies of Preliminary Design. - Springer Publishers, 2014. 628 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8751-2>.
10. Hannapel S., Vlahopoulos N. Introducing Uncertainty in Multidiscipline Ship Design. Naval Engineers Journal. 2010. 122(2). P. 41 – 52. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2010.00267.x>
11. Титов А.И. Определение мощности энергетической установки транспортных судов на начальных стадиях проектирования / А.И. Титов, А.Н. Четыркин, М.В. Михайлов. – Л.: Судостроение. – 1997. - № 6. - С. 42- 46.

12. Molland, A.F., Turnock, S. R. and Hudson, D.A. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power. Cambridge University Press. 2011. 544 pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511974113>.
13. Бронников А.В. Разработка основных технико-эксплуатационных требований на проектирование морского судна Учебное пособие. - СПб.: изд. центр СПбГМТУ, 1997. 56 с.
14. Buxton I.L. Engineering economics and ship design. 3rd ed. (University of Newcastle upon Tyne, Dept of Marine Technology). BSRA, 1987, 143 p. <https://doi.org/10.1080/00137917208902718>.
15. Соколов В.П. Постановка задач экономического обоснования судов. Л.: Судостроение, 1987. 162 с.
16. Watson D.G.M. Practical Ship Design. 2nd ed. Elsevier, 2002. 531 pp.
17. Бреслав Л.Б. Технико-экономическое обоснование средств освоения Мирового океана. Л.: Судостроение, 1982. 240 с.

References

1. Yang, Y., A study on the preliminary ship design method using deterministic approach and probabilistic approach including hull form / Y. Yang, C. Park, K. Lee, J.C. Suh // *Journal Structural and Multidisciplinary Optimization* – 2007. 33 (6). Pp. 529-539. <https://doi.org/10.1007/s00158-006-0063-5>.
2. Oficial'nyj sajt AO "Vostochnyj Port". Web. 25 Mar. 2022 <<https://www.vostport.ru>>
3. Setevoe izdanie PRIMPRESS. Web. 25 Mar. 2022 <<https://primpress.ru/article/79986>>.
4. Informacionno-analiticheskoe agentstvo «PortN'yus». Web. 25 Mar. 2022 <<https://portnews.ru/news/273629/>>.
5. Oficial'nyj sajt Kompanii OOO «Ugol' Invest». Web. 25 Mar. 2022 <<http://coalinvest.ru/stavki-frahta-na-perevozki-uglya-t/>>.
6. Sostoyanie i dinamika cen na ugol'nuyu produkciju. Ezhemesyachnyj informacionnyj byulleten'. Web. 25 Mar. 2022 <<https://www.rosugol.ru>>.
7. Informacionno-analiticheskoe agentstvo Oil Monster. Web. 25 Mar. 2022 <<https://www.oilmonster.com/bunker-fuel-prices>>.
8. Vashedchenko A.N. Avtomatizirovannoe proektirovanie sudov. Uchebnoe posobie. - L.: Sudostroenie, 1985. 164 p.
9. Papanikolaou A. Ship Design - Methodologies of Preliminary Design. - Springer Publishers, 2014. 628 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8751-2>.
10. Hannapel S., Vlahopoulos N. Introducing Uncertainty in Multidiscipline Ship Design. *Naval Engineers Journal*. 2010. 122(2). P. 41 – 52. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2010.00267.x>
11. Titov A.I. Opredelenie moshchnosti energeticheskoj ustanovki transportnyh sudov na nachal'nyh stadiyah proektirovaniya (Determining the capacity of the power plant of transport ships at the initial stages of design) *Sudostroenie* 6. (1997): 42- 46.
12. Molland, A.F., Turnock, S. R. and Hudson, D.A. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power. *Cambridge University Press*. 2011. 544 pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511974113>.
13. Bronnikov A.V. Razrabotka osnovnyh tekhniko-ekspluatacionnyh trebovanij na proektirovanie morskogo sudna Uchebnoe posobie. - SPb.: izd. centr SPbGMTU, 1997. 56 p.
14. Buxton I.L. Engineering economics and ship design. 3rd ed. (*University of Newcastle upon Tyne, Dept of Marine Technology*). BSRA, 1987, 143 p. <https://doi.org/10.1080/00137917208902718>.
15. Sokolov V.P. Postanovka zadach ekonomicheskogo obosnovaniya sudov. L.: Sudostroenie, 1987. 162 p.
16. Watson D.G.M. Practical Ship Design. 2nd ed. *Elsevier*, 2002. 531 p.
17. Breslav L.B. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie sredstv osvoeniya Mirovogo okeana. L.: Sudostroenie, 1982. 240 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Китаев Максим Владимирович, к.т.н.,
доцент, департамента Морской техники и
транспорта, Политехнический институт
(Школа), Дальневосточный федеральный
университет (ФГАОУ ВО «ДВФУ»),
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс-
10, E-mail: kitaev.mv@dvfu.ru

Maksim V. Kitaev, Candidate of Engineering
Sciences, Associate Professor, department of
Marine Engineering and Transport, Polytechnic
Institute (School), Far Eastern Federal University,
10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922

Статья поступила в редакцию 23.09.2022; опубликована онлайн 20.12.2022.
Received 23.09.2022; published online 20.12.2022.