

Проектирование и конструкция судов

Научная статья

УДК 629.12

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/42-58>

М.В. Китаев, Д.В. Тюфтяев, Д.А. Тортыжева

КИТАЕВ МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., доцент, kitaev.mv@dvfu.ru✉,<https://orcid.org/0000-0001-5345-6333>ТЮФТЯЕВ ДМИТРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – студент, tyuftyaev.dv@students.dvfu.ruТОРТЫЖЕВА ДАРЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА – студент, tortyzheva.da@students.dvfu.ru

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Математическая модель проектирования грузового судна

Аннотация. В статье рассмотрена математическая модель, предназначенная для автоматизации расчетов, выполняемых на начальных стадиях проектирования морских грузовых судов (танкеры, балкеры, контейнеровозы и универсальные сухогрузы). Для определения главных размерений и коэффициентов полнот в модели используются формулы, результаты статистического анализа данных современных судов-прототипов. В расчетах ходкости с использованием метода Холтропа учитываются особенности обводов и формы корпуса, характеристики носового бульба. Для определения гидродинамических и геометрических характеристик гребного винта применяются аппроксимирующие полиномы, полученные для коэффициентов упора и момента гребных винтов серии В. Марка. Характеристики главного двигателя выбираются по специальному алгоритму из созданной авторами базы данных судовых дизельных двигателей, выпускаемых как в нашей стране, так и за рубежом. Рассчитываются основные показатели остойчивости и прочности проектируемых судов. В качестве исходных данных выступают скорость, грузоподъемность и величины, характеризующие условия проектирования, постройки и эксплуатации судов. К результатам относятся главные размерения и коэффициенты полнот, водоизмещение и составляющие нагрузки, строительная стоимость и экономические показатели функциональной эффективности. Функциональная эффективность и экономические показатели оцениваются с учетом проектного срока службы судна и инфляции. Математическая модель реализована в виде программы для ЭВМ и может использоваться на начальных этапах проектирования для автоматизации расчетов и экспресс-оценки характеристик, элементов и экономической эффективности судов-претендентов для заданных линий эксплуатации.

Ключевые слова: проектирование судов, математическая модель, автоматизация вычислений, функциональная эффективность, экономические показатели

Для цитирования: Китаев М.В., Тюфтяев Д.В., Тортыжева Д.А. Математическая модель проектирования грузового судна // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 42–58.

Введение

Морской транспорт широко используется в международной торговле для доставки грузов от производителей к потребителям как наиболее надежный и экономичный в сравнении с автомобильным, железнодорожным и воздушным [18]. Потребность в морских перевозках и новых судах во многом зависит от уровня развития и ориентированности экономики государства. Несмотря на подъемы и спады в международной торговле, долгосрочные перспективы в области судостроения остаются хорошими. С увеличением численности населения растет и потребность в готовых товарах, энергоресурсах и сырье, которые перевозятся в основном морем.

Грузовые суда являются наиболее востребованными и многочисленными на рынке

© Китаев М.В., Тюфтяев Д.В., Тортыжева Д.А., 2022

Статья поступила: 30.05.2022; рецензирование: 08.08.2022; 07.12.2022.

морских перевозок (рис. 1), а спрос на проектирование и постройку таких судов увеличивается (рис. 2). В количественном отношении и по тоннажу наиболее многочисленными являются универсальные сухогрузные суда (УСС), навалочники, танкеры и контейнеровозы [17, 20]. Из анализа возрастного состава флота следует, что в обозримом будущем станет актуальной проблема обновления и пополнения флота УСС и нефтеналивных судов новыми судами (рис. 3) [9]. Работы в данном направлении ведутся уже сейчас. Так, по данным 2020 г., мировой флот танкеров, предназначенных для перевозки сжиженного природного газа (LNG), насчитывал 642 судна. При этом в период с 2010 по 2021 г. количество новых судов постоянно увеличивалось [17].

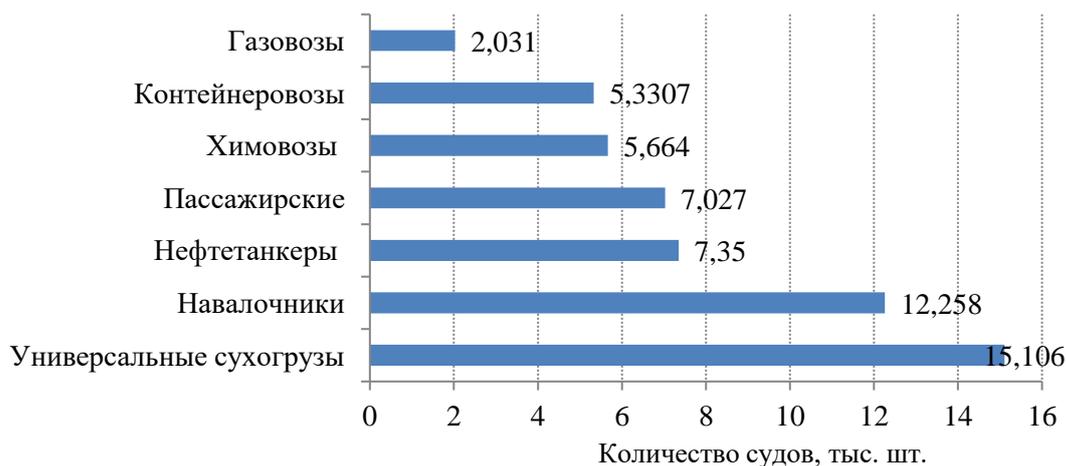


Рис. 1. Количество судов различных типов (по состоянию на 1 января 2021 г.) [17]

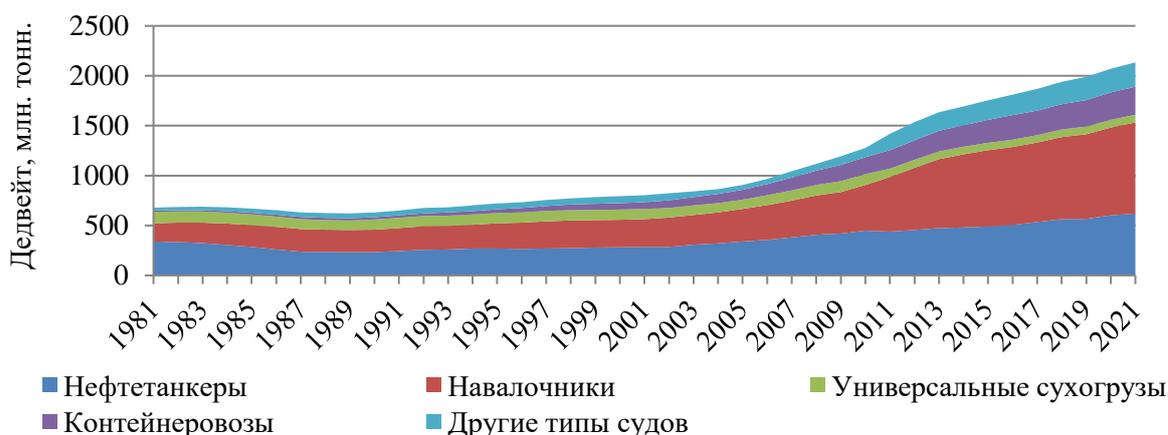


Рис. 2. Изменение состава мирового флота по типам судов [20]

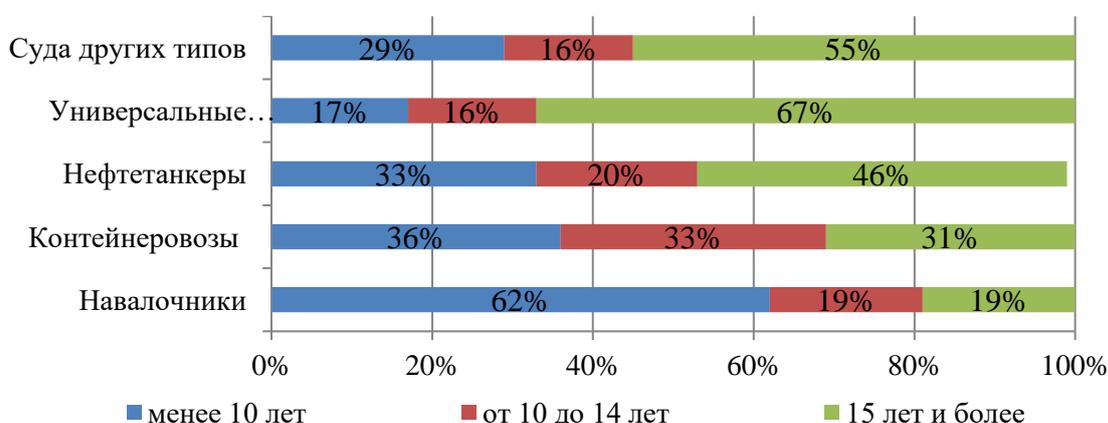


Рис. 3. Возрастной состав мирового флота (по состоянию на 2019–2020 гг.) [17]

Решение задач, связанных с обновлением и пополнением отечественного флота, невозможно без автоматизации основных расчетов по проектированию судов и теории корабля. Системы автоматизированного проектирования (САПР) в большей степени предназначены для поздних этапов проектирования (эскизное и техническое проектирование, разработка рабочей и конструкторской документации). В то же время этапы, связанные с расчетами технико-экономического обоснования, разработкой основных технико-эксплуатационных требований и последующим формированием задания на проектирование, как показывает практика, слабо автоматизированы. Проблема в том, что методики, используемые при проектировании судов, сложно алгоритмируются, так как основаны на использовании большого количества графиков, таблиц, номограмм, алгоритмов и численных методов. Каждый тип судов имеет свои особенности, что не позволяет применять одни и те же методики и зависимости для разных типов судов.

Для решения указанной задачи в настоящем исследовании разработана математическая модель, реализованная в виде программы для ЭВМ и предназначенная для автоматизации расчетов, выполняемых на начальных стадиях проектирования морских грузовых судов (танкеры, балкеры, контейнеровозы и универсальные сухогрузы). При разработке модели использовались как классические методы теории корабля и проектирования судов, так и специальные методы и алгоритмы, разработанные авторами для учета конструктивных особенностей судов рассматриваемых типов.

Анализ главных размерений и характеристик судов

Для расчета главных размерений и характеристик формы корпуса судов рассматриваемых типов в модели использовались результаты анализа значений проектных характеристик судов-прототипов, построенных в период с 2000 по 2021 г. в нашей стране и за рубежом. В качестве источников исходной информации использовались официальные базы данных классификационных обществ – членов МАКО (Международная ассоциация классификационных обществ): Российский морской регистр судоходства (РС) [6], Американское бюро судоходства (ABS) [10] и Детнорский Веритас (DNV) [22]. Количество проанализированных судов (по типам): навалочники – 100, УСС – 46, контейнеровозы – 42 и нефтетанкеры – 52.

В качестве примера для навалочников показаны зависимости, характеризующие результаты анализа запасов различных видов топлива и смазочного масла в зависимости от мощности главного двигателя (N_{20}) (рис. 4) Так, запасы дизельного топлива по отношению к мазуту анализируемых судов составляют k_1 , а запасы смазочного масла по отношению к запасам мазута – k_2 . Следует отметить, что дизельное топливо с низким содержанием серы (MDO, Marine Diesel Oil) используется в основном для прохождения зон контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферу [11], и его запасы на судне малы в сравнении с запасами более дешевого мазута (HFO, Heavy Fuel Oil).

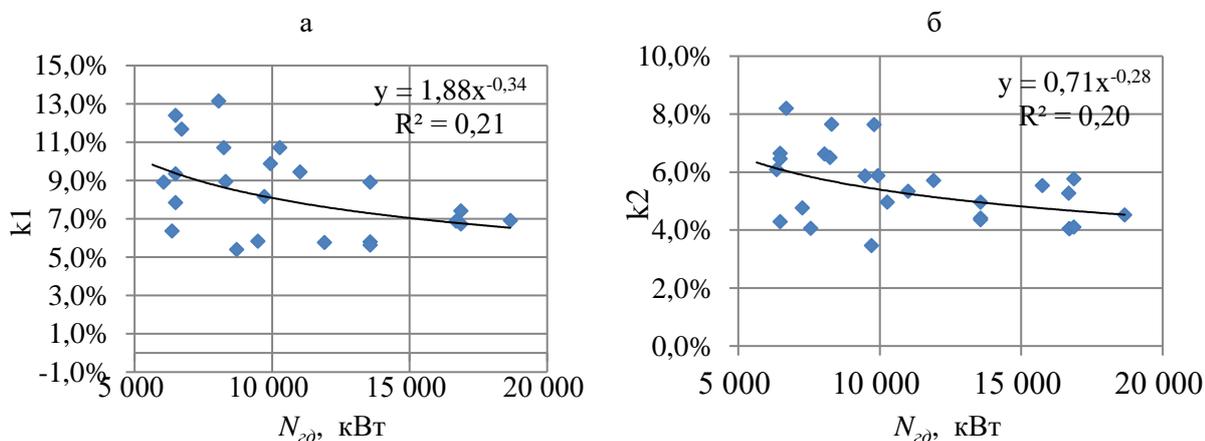


Рис. 4. Запасы дизельного топлива (а) и смазочного масла (б)

На рис. 5 показаны зависимости главных размерений – наибольшей длины ($L_{нб}$) и ширины (B) в функции от дедвейта (DW) и контейнероёмкости (n).

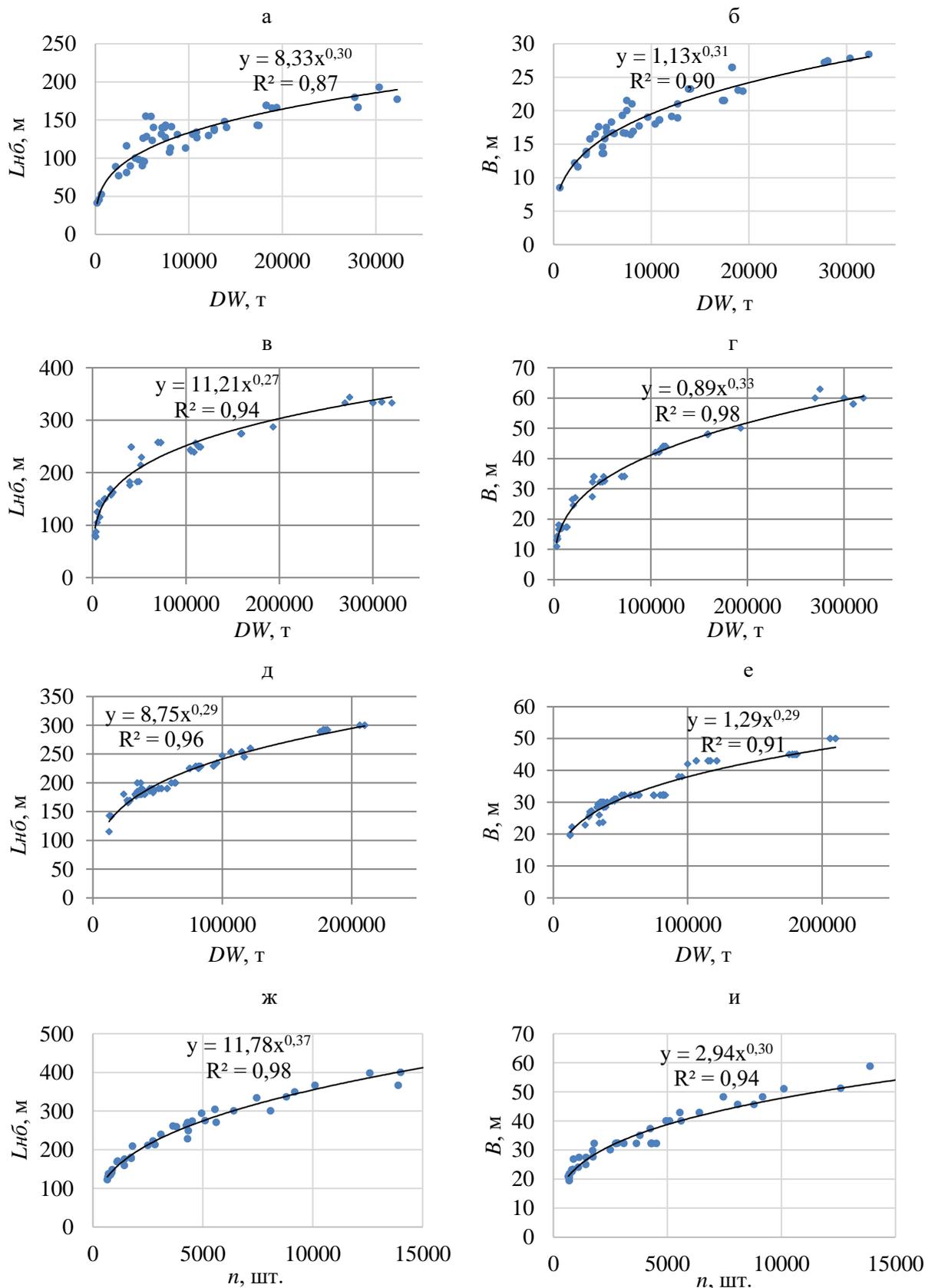


Рис. 5. Результаты обработки данных судов-прототипов:
а, б – УСС; в, г – нефтетанкеры; д, е – навалочники; ж, и – контейнеровозы

Из приведенных графиков видно, что выбор судов для анализа осуществлялся таким образом, чтобы их главные размерения и проектные характеристики были (по возможности) равномерно распределены между максимальными и минимальными значениями. В целом отметим высокую достоверность полученных зависимостей. Так, для основных формул значения коэффициента детерминации (R^2), показывающего степень соответствия линии тренда исходным данным, превышает 0,80.

В табл. 1 показаны результаты анализа главных размерений и характеристик судов-прототипов. Формулы для определения запасов балласта (P_{δ}) получены в функции от дедвейта, а для соотношений главных размерений – от расчетной длины (L). Установлены диапазоны изменения значений адмиралтейского коэффициента (C_a) и коэффициента утилизации водоизмещения по дедвейту (η_{DW}) для рассматриваемого диапазона характеристик (см. рис. 5).

Таблица 1

Результаты анализа главных размерений и характеристик судов

Величина	Тип судна			
	УСС	Нефтетанкеры	Навалочники	Контейнеровозы
D , т	$1,31 \cdot DW + 788$	$1,13 \cdot DW + 5294$	$1,10 \cdot DW + 4636$	$0,78 \cdot DW - 1385$
$L_{нб}$, м	$8,33 \cdot DW^{0,30}$	$11,21 \cdot DW^{0,27}$	$8,75 \cdot DW^{0,29}$	$11,78 \cdot n^{0,37}$
L , м	$0,96 \cdot L_{нб} - 3,03$	$0,96 \cdot L_{нб} - 1,03$	$1,00 \cdot L_{нб} - 7,49$	$0,97 \cdot L_{нб} - 5,95$
B , м	$1,12 \cdot DW^{0,31}$	$0,88 \cdot DW^{0,33}$	$1,29 \cdot DW^{0,29}$	$2,93 \cdot n^{0,30}$
H , м	$0,40 \cdot DW^{0,34}$	$0,36 \cdot DW^{0,35}$	$0,57 \cdot DW^{0,31}$	$0,93 \cdot n^{0,36}$
T , м	$0,25 \cdot DW^{0,36}$	$0,26 \cdot DW^{0,34}$	$0,52 \cdot DW^{0,28}$	$1,43 \cdot n^{0,26}$
L/B	$0,0090 \cdot L + 5,42$	$0,0006 \cdot L + 5,81$	$0,0005 \cdot L + 6,27$	$0,0065 \cdot L + 5,21$
B/T	$0,0026 \cdot L + 2,55$	$0,0001 \cdot L + 2,79$	$0,0004 \cdot L + 2,59$	$0,0017 \cdot L + 2,36$
L/H	$0,0158 \cdot L + 11,78$	$0,0004 \cdot L + 11,27$	$0,0002 \cdot L + 11,43$	$0,0033 \cdot L + 11,38$
$N_{сд}$, кВт	$0,60 \cdot V_S^{3,39}$	$0,7834 \cdot V_S^{3,52}$	$0,3372 \cdot V_S^{3,82}$	$0,1088 \cdot V_S^{3,89}$
P_{δ} , т	$0,28 \cdot DW^{1,0354}$	$0,57 \cdot DW^{0,9696}$	$0,12 \cdot DW^{1,1192}$	$1,89 \cdot DW^{0,82}$
η_{DW}	$0,58 \div 0,82$	$0,64 \div 0,89$	$0,74 \div 0,89$	$0,67 \div 0,77$
C_a	$184 \div 528$	$217 \div 738$	$276 \div 967$	$453 \div 779$

Математическая модель проектирования грузового судна

Математическая модель имеет алгоритмическую структуру и предназначена для расчета главных размерений и коэффициентов полнот, составляющих водоизмещения порожнем и дедвейта, среднесерийной строительной стоимости, показателей функциональной эффективности и экономических критериев. Модель реализована в виде программы для ЭВМ, позволяет производить расчеты, выполняемые на начальных стадиях проектирования [4], по теории корабля и проектированию для четырех типов судов: балкер, танкер, контейнеровоз и УСС. Выбор типа судна определяет совокупность зависимостей, используемых для определения главных размерений, составляющих нагрузки, дедвейта, строительной стоимости и других величин. Показатели функциональной эффективности в модели рассчитываются за год (расчетный период).

Преимущества предлагаемой модели состоят в следующем:

- выполнение (автоматизация) расчетов для четырех типов судов;
- учет особенностей формы корпуса (параметров нового бульба и кормовой оконечности, формы (угла притыкания) носовой ветви КВЛ, выступающих частей, положения абсциссы центра величины и центра тяжести КВЛ и др.);
- учет геометрических особенностей винта (количество и угол откидки лопастей);
- возможность выбора типа и характеристик главного двигателя из специально созданной базы данных (БД) современных судовых дизельных двигателей (учитывается возможность использования редуктора для высоко- и среднеоборотных двигателей);

- учет количества судов в серии и «интерес» завода в расчетах строительной стоимости;
 - реализация возможности учета курсового угла и высоты волнения;
 - расчет критериев с учетом дисконтирования, указание срока службы судна.
- Представлена принципиальная блок-схема математической модели (рис. 6).

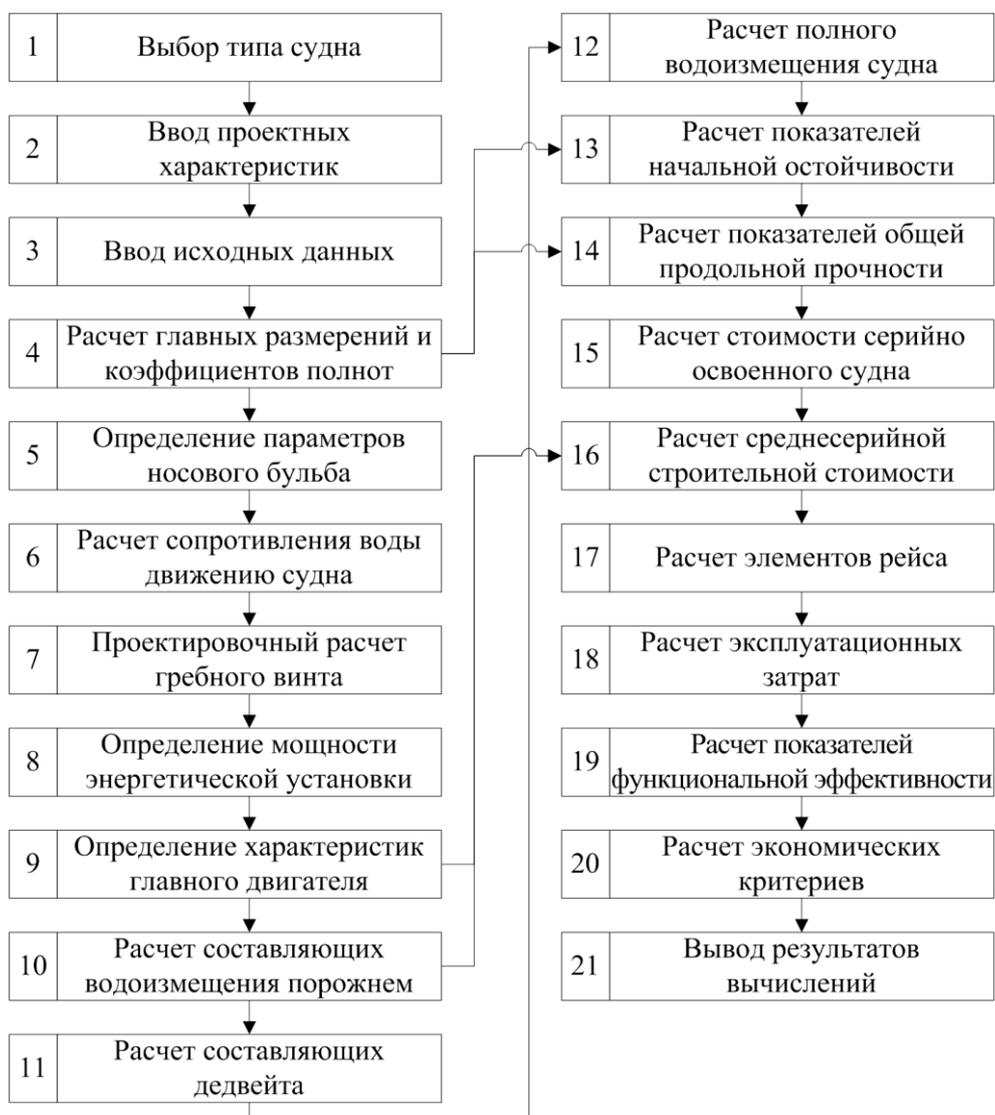


Рис. 6. Принципиальная блок-схема математической модели

В качестве характеристик на рис. 6 приняты скорость и полезная грузоподъемность, а исходные данные – это величины, отражающие условия постройки и эксплуатации судна (количество судов в серии, протяженность линии, стоимость топлива, портовые сборы, тип двигателя, количество лопастей винта, характеристики волнения и др.).

Расчет главных размерений в рассматриваемой модели осуществляется по зависимостям, приведенным ранее в табл. 1, а коэффициенты полнот определяются по формулам, приведенным в источнике [15], в зависимости от типа судна.

Алгоритм проектирования бульбовой оконечности позволяет учитывать тип, форму и основные геометрические параметры бульба. За основу приняты теория и формулы, приведенные в работах [13, 19]. Геометрические параметры носового бульба, учитываемые в математической модели, показаны на рис. 7, где следующие обозначения: НПП – носовой перпендикуляр; ОП – основная плоскость; ВВ – ширина бульба; LPR – длина выступающей за НПП части бульба; НВ – высота; ZB – аппликата самой удаленной от НПП точки; TFT – осадка судна на НПП; АВТ и АВЛ – площади поперечного и продольного сечений бульба соответственно.

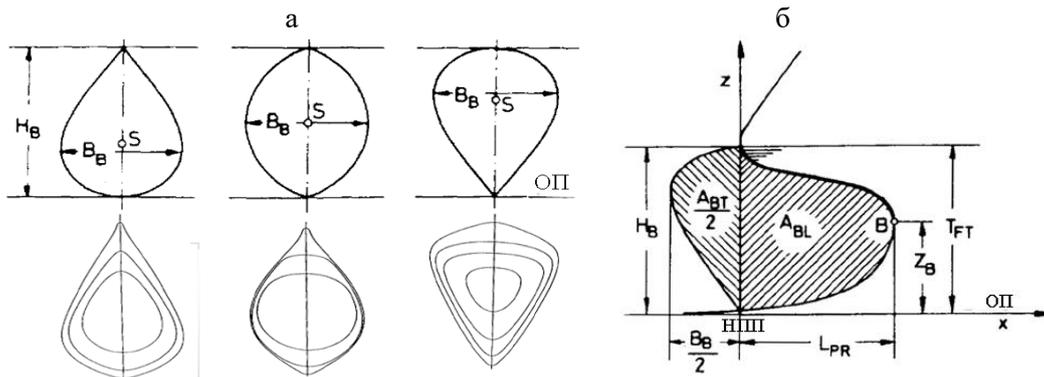


Рис. 7. Геометрические характеристики носового бульба:
а – условные сечения в плоскости НПП; б – проектные параметры

Алгоритм определения геометрических параметров бульба приведен на рис. 8, где использованы следующие обозначения: $L_{ПП}$ – длина судна между перпендикулярами; $L_{БЛ}$ – длина судна по КВЛ; B и T – ширина и осадка судна соответственно; C_b и C_M – коэффициент общей полноты и полноты мидель-шпангоута соответственно, V_s – скорость хода судна. Величины C_{LPR} , C_{ZB} , C_{BB} и C_{ABT} характеризуют безразмерные коэффициенты длины, высоты, ширины и полноты поперечного сечения бульба соответственно [13].

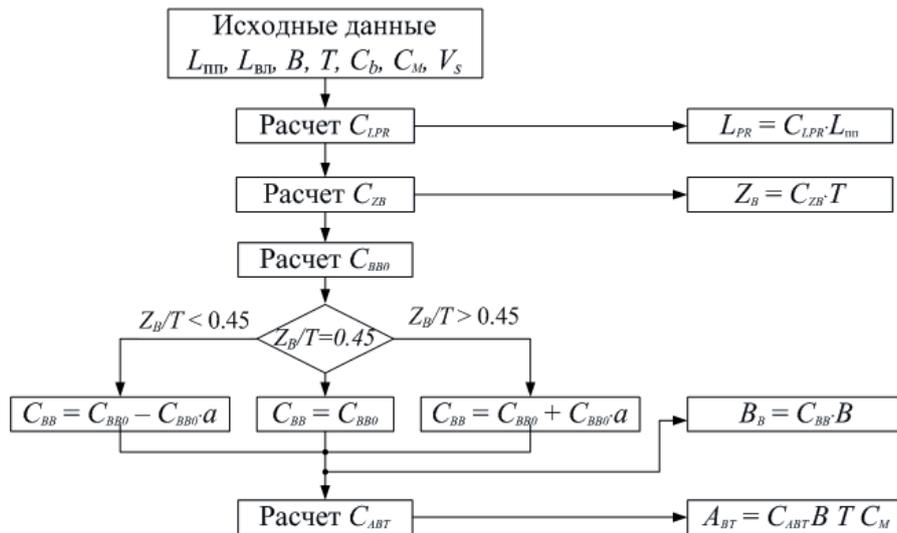


Рис. 8. Алгоритм определения характеристик бульба

Коэффициент длины выступающей части бульба определяется по формуле

$$C_{LPR} = 0,271 \cdot C_b \cdot B/L - 0,015.$$

Коэффициент ширины рассчитывается по следующей зависимости:

$$C_{BB} = (a_{y1} (L/B) + a_y)/100,$$

где $a_y = -13,19 \cdot C_b^2 + 25,54 \cdot C_b - 10,12$ и $a_{y1} = 3,65 \cdot C_b^2 - 4,10 \cdot C_b + 2,33$.

Поправка на отклонение Z_B/T от стандартного значения (0,45) определяется по формуле $a = (0,45 - Z_B/T) \cdot 0,1$.

Значения коэффициентов, характеризующих геометрию бульбов разных типов, приведены в табл. 2.

Сопротивление движению судна рассчитывалось по следующей зависимости:

$$R = R_0 + R_{AA} + R_{AW}, \tag{1}$$

где R_0 – сопротивление на тихой воде; R_{AA} – добавочное сопротивление от ветра; R_{AW} – добавочное сопротивление действия волн.

Диапазоны изменения коэффициентов формы носовых бульбов

Коэффициент	Диапазоны изменения	
	мин.	макс.
C_{BB}	0,170	0,200
C_{LPR}	0,018	0,031
C_{ZB}	0,260	0,550
C_{ABL}	0,068	0,146
C_{ABT}	0,064	0,122

Для сопротивления на тихой воде использовался метод Холтропа и Меннена [12], согласно которому сопротивление на тихой воде определяется по формуле

$$R_0 = R_F(1+k_I) + R_{AP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A, \tag{2}$$

где R_F – сопротивление трения; $1+k_I$ – форм-фактор, характеризующий долю вязкостного сопротивления корпуса судна по отношению к R_F ; R_{AP} – сопротивление выступающих частей; R_W – волновое сопротивление; R_B – сопротивление бульба; R_{TR} – сопротивление погруженной части кормы; R_A – корреляционная составляющая сопротивления модели.

Метода Холтропа позволяет учитывать конструктивные особенности корпуса: бульб, транец, угол входа носовой ветви ватерлинии, выступающие части и др.

Аэродинамическая составляющая в формуле (1) определяется как

$$R_{AA} = C_{AA} \frac{\rho_A v_A^2}{2} S_A, \tag{3}$$

где C_{AA} – коэффициент сопротивления воздуха (рассчитывается по формуле Ишервуда [1]); ρ_A – плотность воздуха; v_A – относительная скорость воздушного потока, м/с; S_A – площадь проекции надводной части корпуса судна на плоскость миделя.

Добавочное сопротивление на волнении рассчитывается по формуле [1]:

$$R_{AW} = \chi_\beta R_{AW}^0, \tag{4}$$

где χ_β – функция влияния курсового угла; R_{AW}^0 – добавочное сопротивление (в расчетах приняты высота волн $h_{3\%} = 1,25$ м, волнение встречное $\beta_w = 180^\circ$).

Сопротивление на встречном волнении:

$$R_{AW}^0 = C_R (100 h_{3\%}/L)^2 I_R(b, n), \tag{5}$$

где C_R – эмпирический параметр; $I_R(b, n)$ – функция, характеризующая отклонение $R_{AW}^0(h_{3\%})$ от квадратичной [1].

Значение b определяется в зависимости от характеристики развитости волнения q_w . Для развитого волнения $q_w = 1$, для развивающегося $q_w < 1$, для ослабевающего $q_w > 1$.

Проектировочный расчет гребного винта выполняется исходя из возможности размещения винта наибольшего диаметра в кормовом подзоре. В основе расчета лежат полиномы, полученные для винтов фиксированного шага серии Трооста (серия В), диапазоны изменения характеристик которых лежат в следующих пределах: число лопастей $2 \leq Z \leq 7$; дисковое отношение $0,4 \leq A_e/A_0 \leq 1,05$; шаговое отношение $0,50 \leq H/D \leq 1,40$; относительная поступь $0 \leq J \leq 1,50$ [1]. Расчет винта выполняется исходя из условия равенства сопротивления движению судна тяге гребного винта, что обеспечивает достижение заданной скорости хода.

Для определения характеристик главного двигателя (фирма изготовитель (*Firm*), модель двигателя (*Model*), номинальная мощность (*Power*), обороты (*Revol*), масса (*Weight*) и количество циклов (*Cycle*)) создана база данных (*Engine.dat*) судовых дизельных двигателей (ABS, AKASAKA, DAIHATSU, MAN B&W и др. – всего 564 модели [8]). Алгоритм выбора главного двигателя (ГД) представлен на (рис. 9).

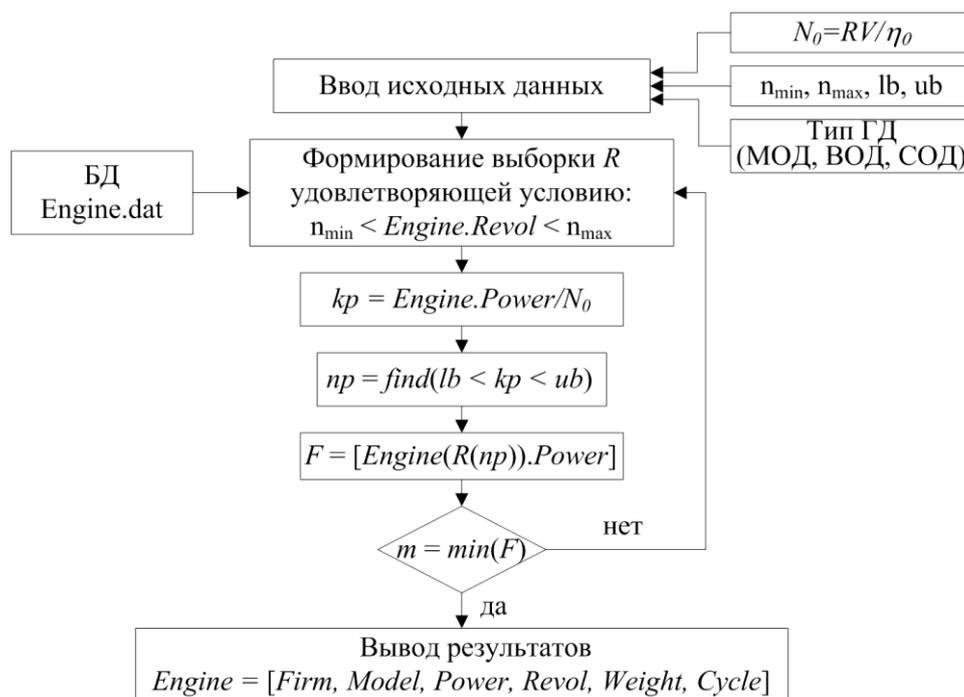


Рис. 9. Алгоритм определения характеристик ГД

На рис. 9 приняты обозначения: n_{min} и n_{max} – диапазон оборотов ГД в об/мин; l_b и u_b – диапазоны изменения коэффициента запаса мощности; N_0 – расчетное значение мощности ГД в кВт; V – скорость хода в м/с; η_0 – пропульсивный коэффициент; kp – коэффициент (характеризует отношение мощностей ГД из БД к расчетному значению); np – индексы элементов, удовлетворяющих диапазонам изменения коэффициента запаса мощности; F – массив ГД, удовлетворяющий диапазонам l_b и u_b ; m – масса ГД.

Тип двигателя:

- малооборотный (МОД) $80 < n < 350$;
- среднеоборотный (СОД) $350 < n < 750$;
- высокооборотный (ВОД) $750 < n < 2500$.

Водоизмещение порожнем рассчитывалось по формуле [21]:

$$D_0 = W_s + W_{eq} + W_m, \tag{6}$$

где W_s – масса стальных конструкций (корпуса, надстроек, фундаментов машин и механизмов, мачт, трапов и др.); W_{eq} – масса оборудования, оснастки, палубных машин и механизмов; W_m – масса ГД и механизмов, расположенных в машинном отделении.

Масса корпусных конструкций определяется по формуле

$$W_s = W_h + W_{sps}, \tag{7}$$

где W_h – масса корпуса; W_{sps} – суммарная масса надстроек.

Для определения массы корпуса судна используется формула

$$W_h = k_{h1} L^{kh2} B^{kh3} H^{kh4}, \tag{8}$$

где L, B, H – длина, ширина и высота борта судна соответственно; $k_{h1}, k_{h2}, k_{h3}, k_{h4}$ – коэффициенты, зависящие от типа судна (табл. 3) [21].

Таблица 3

Значения коэффициентов k в зависимости от типа судна

Тип судна	k_{h1}	k_{h2}	k_{h3}	k_{h4}
Танкер	0,0361	1,60	1,0	0,220
Балкер	0,0328	1,60	1,0	0,220
Контейнеровоз	0,0293	1,760	0,712	0,374
УСС	0,0313	1,675	0,850	0,280

Масса надстройки в зависимости от типа судна рассчитывается по формуле [21]:

- УСС: $W_{sps} = 10 \div 12 \% W_h$;
- Танкер: $W_{sps} = 6 \div 8 \% W_h$;
- Балкер: $W_{sps} = 6 \div 7 \% W_h$.

Масса оборудования, снаряжения, оснастки, палубных машин и механизмов определяется по формуле

$$W_{eq} = k_{e1} (L B H)^{k_{e2}}, \tag{9}$$

где L, B, H – длина, ширина и высота борта судна соответственно; k_{e1}, k_{e2} – коэффициенты, зависящие от типа судна (табл. 4) [21].

Таблица 4

Значения коэффициентов k_{e1}, k_{e2}

Тип судна	k_{e1}	k_{e2}
Танкер	10,820	0,410
Балкер	6,1790	0,480
Контейнеровоз	0,1156	0,850
УСС	0,5166	0,750

Масса главного двигателя и механизмов, расположенных в машинном отделении:

$$W_m = k_{m1} \cdot Power^{k_{m2}}, \tag{10}$$

где k_{m1}, k_{m2} – коэффициенты, зависящие от типа ГД [21].

Дедвейт рассчитывается по формуле

$$DW = P_g + P_{cr} + P_{fl} + P_b, \tag{11}$$

где P_g – полезная грузоподъемность; P_{cr} – масса экипажа с багажом, провизией и пресной водой; P_{fl} – запасы топлива и смазочного масла для ГД; P_b – балласт (при необходимости).

Количество членов экипажа в модели рассчитывается по формуле

$$n_{\text{ЭК}} = k_{e1} + k_{e2} (L B H)/1000 + k_{e3} N_{\text{ЭД}}, \tag{12}$$

где k_{e1}, k_{e2}, k_{e3} – коэффициенты, зависящие от страны найма и типа судна [21].

Алгоритм расчета водоизмещения (рис. 10) основан на итерационной процедуре, связанной с подбором заданного параметра в рассматриваемом выражении (в представленной модели это DW судна). Вычисления выполняются до тех пор, пока расчетное значение грузоподъемности P_{gc} не будет равно заданному (проектному) значению P_g судна.

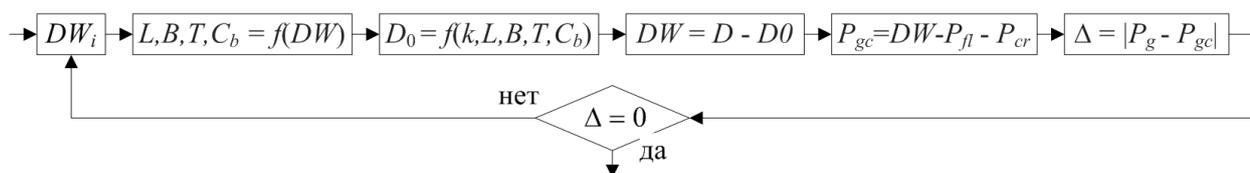


Рис. 10. Алгоритм расчета водоизмещения и составляющих нагрузки

Показатели остойчивости рассчитывались по Правилам [5], как для судов с круглым скуловым килем. Слагаемые в формуле метацентрической высоты определялись с учетом рекомендаций [4, 5].

Прочность оценивалась по изгибающему моменту, действующему на судно:

$$M = D \cdot L/k, \tag{17}$$

где D – водоизмещение судна в грузу; k – коэффициент, зависящий от типа судна [2].

Строительная стоимость судна определяется по формуле [21]:

$$K_s = Q_b (1 + K_a). \tag{13}$$

где K_a – коэффициент дополнительных затрат на постройку.

Базовая составляющая строительной стоимости судна определяется по формуле [21]:

$$Q_b = (K_h + K_{eq} + K_m + X_s) (1 + K_b), \quad (14)$$

где K_b – интерес завода в процентах; K_h – стоимость корпуса; K_{eq} – стоимость оборудования корпуса; K_m – стоимость оборудования машинного отделения (МО); X_s – стоимость оборудования, размещенного на верхней палубе (краны, шпильки, лебедки и др.).

Стоимость серийно освоенного судна:

$$K = \frac{K_s}{x^b}, \quad (15)$$

где x – количество судов в серии; b – коэффициент серийности (рис. 11) [18].

Формула для определения коэффициента серийности следующая:

$$b = 0,9996 \cdot x^{-0,097}. \quad (16)$$

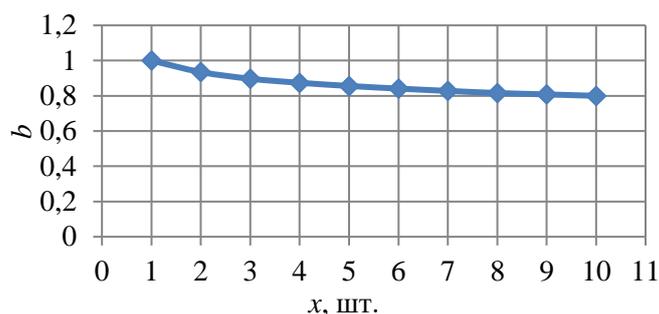


Рис. 11. Зависимость коэффициента b от количества судов в серии

Расчет элементов рейса учитывает ходовое, стояночное время и другие показатели, используемые в расчетах технико-экономического обоснования [7].

Время проведения погрузочно-разгрузочных операций:

$$T_{pr} = 2 ((P_g/q_{lu}) + t_a), \quad (18)$$

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

Количество рейсов судна в течение года:

$$n_{rt} = T_{yr} / (T_r + T_{pr}), \quad (19)$$

где T_{yr} – период навигации судна; T_r – время рейса; T_{pr} – время погрузки / разгрузки.

Годовой объем перевозок:

$$Q = P_g n_{rt}. \quad (20)$$

Эксплуатационные расходы судна вычисляются по формуле [21]:

$$C_A = C_{adm} + C_r + C_v, \quad (21)$$

где C_{adm} – административные отчисления; C_r – расходы, связанные с обслуживанием и эксплуатацией судна; C_v – рейсовые расходы.

Расходы на обслуживание и эксплуатацию определяются по формуле [21]:

$$C_r = C_{cr} + C_{sup} + C_{mr} + C_{ins} + C_{dock}, \quad (22)$$

где C_{cr} – затраты на содержание экипажа; C_{sup} – затраты на снабжение; C_{mr} – затраты на содержание оборудования и ремонт; C_{ins} – страховка; C_{dock} – затраты на докование.

Рейсовые расходы определяются по формуле [21]:

$$C_v = C_f + C_{pd} + C_{tp} + C_{cd}, \quad (23)$$

где C_f – затраты на топливо; C_{pd} – портовые и маячные сборы; C_{tp} – затраты на буксировку и лоцманскую проводку; C_{cd} – плата за проход каналов (канальные сборы).

Для оценки эффективности рассчитываются как статические, так и динамические показатели, формулы для которых приведены ниже.

Себестоимость эксплуатации судна (транспортные издержки) [7]:

$$TRC = \frac{C_A}{Q}. \tag{24}$$

Требуемая фрахтовая ставка [15]:

$$RFR = \frac{(CR)K_s + C_A}{Q}. \tag{25}$$

Чистый приведенный доход [14]:

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{A'}{(1+i)^t} - K, \tag{26}$$

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

Результаты моделирования

В настоящем разделе приведены примеры результатов расчетов, выполненных с использованием вышеописанной математической модели для следующих исходных данных: количество ходовых дней – 340 суток, протяженность линии – 2000 миль, стоимость топлива – 850 долл./т. Значения проектных скоростей хода (средние по статистике значения) приняты следующие: 14,00 уз. – навалочники, 14,50 уз. – танкера, 21,50 уз. – контейнеровозы. Отдельно задавались тип ГД, нормы грузообработки, страна найма экипажа, ставки портовых сборов и др. На рис. 12 показаны примеры сравнения данных судов-прототипов с расчетными значениями, полученными по формулам, приведенным в табл. 1, в зависимости от дедвейта и контейнеровместимости.

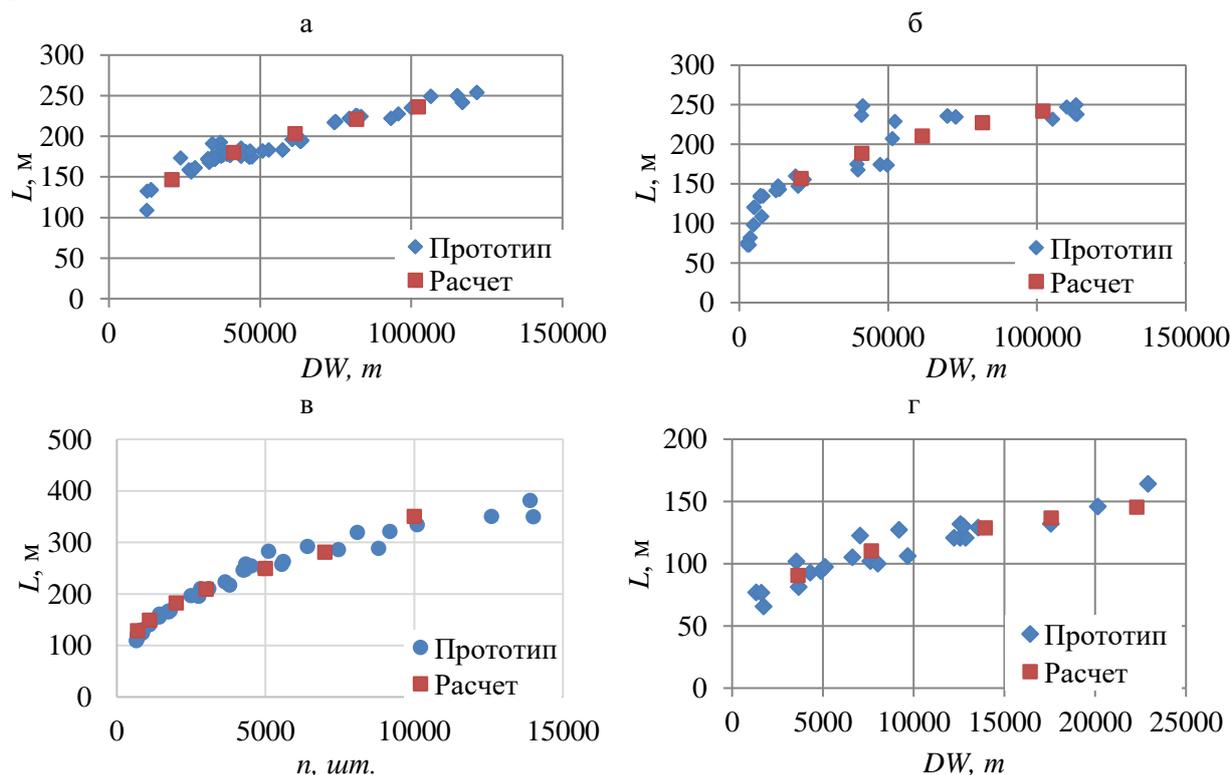


Рис. 12. Зависимость расчетной длины от дедвейта и контейнеровместимости: а – навалочники; б – нефтетанкеры; в – контейнеровозы; г – УСС

В табл. 5–8 показаны результаты моделирования. Скорость и грузоподъемность (контейнеровместимость) приняты в качестве параметров. Главные размерения, характеристики главного двигателя, дедвейт, годовой доход (A), себестоимость эксплуатации (TRC), строительная стоимость (K) и другие показатели определялись по алгоритму, представленному на рис. 6.

В качестве примера в табл. 9 для навалочника грузоподъемностью $Pg = 70000$ т и исходных данных, приведенных выше, даны уточненные результаты вычислений.

Таблица 5

Главные размеры и характеристики навалочников

P_g , т	20000	40000	60000	80000	100000
L , м	146,50	180,07	203,03	221,08	236,23
B , м	23,96	29,29	32,95	35,83	38,26
T , м	9,08	11,04	12,39	13,44	14,33
H , м	12,68	15,68	17,77	19,42	20,81
N , кВт	4720	7080	9170	11200	13320
Модель ГД	mitsubishi 4UEC52LA	MITSUBISHI 6UEC52LA	MAN B&W 7S46MC-C	WARTSILA SULZER 7RTA52U-B	WARTSILA SULZER 6RTA62U
DW , т	20793	41225	61557	81889	102321
L/B	6,12	6,15	6,16	6,17	6,17
B/T	2,64	2,65	2,66	2,67	2,67
K , млн. долл.	3,32	28,58	47,28	60,53	69,31

Таблица 6

Главные размеры и характеристики танкеров

P_g , т	20000	40000	60000	80000
L , м	164,89	194,95	215,35	231,14
B , м	25,87	31,77	35,89	39,15
T , м	9,04	11,21	12,75	13,97
H , м	12,82	15,93	18,12	19,87
N_{20} , кВт	5125	7080	8850	10480
Модель ГД	MAN B&W - 5S42MC	MITSUBISHI - 6UEC52LA	MITSUBISHI - 5UEC60LS	MAN B&W - 8S46MC-C
DW , т	24 880,53	46 089,53	66 498,53	86 307,53
L/B	6,37	6,14	6,00	5,90
B/T	2,86	2,83	2,82	2,80
K , млн. долл.	15,59	40,25	57,62	69,43

Таблица 7

Главные размеры и характеристики контейнеровозов

n , шт.	700	1100	2000	5000	7000	10000
L , м	128,32	149,17	182,49	249,53	280,90	350,21
B , м	21,09	23,93	28,37	37,04	40,99	49,55
T , м	8,56	9,42	10,71	13,10	14,14	14,00
H , м	11,09	12,78	15,48	20,88	23,40	28,96
N_{20} , кВт	10115	12000	15540	24560	30 880	43320
Модель ГД	MITSUBIS HI7UEC50L SII	WARTSILA SULZER 6RTA58T	WARTSILA SULZER 7RTA62U	WARTSILA SULZER 8RT-flex68T	MITSUBISHI8 UEC85LSII	MAN B&W 12K80MC-C
DW , т	11421	16777	28180	63455	86438	154014
L/B	6,08	6,23	6,43	6,74	6,85	7,07
B/T	2,46	2,54	2,65	2,83	2,90	3,54
	19,93	20,84	23,91	28,83	43,31	19,93

Таблица 8

Главные размеры и характеристики УСС

V_s , уз.	11,5	14,3	15,1	16,5	18,1
P_g , т	3300	6100	11100	13000	15100
L , м	90,47	110,12	128,66	136,66	145,38
B , м	15,17	17,95	20,52	21,61	22,79
T , м	5,44	7,15	8,88	9,66	10,53
H , м	7,23	9,50	11,81	12,85	14,02
$N_{\text{сд}}$, кВт	1 030	2 600	3 860	5 600	8 955
Модель ГД	MAN B&W -	MAN B&W -	MITSUBISHI -	MAN B&W -	MAN B&W -
DW , т	3 629	7 685	13 949	17 583	22 299
L/B	5,96	6,14	6,27	6,32	6,38
B/T	2,79	2,51	2,31	2,24	2,16
K , млн. долл	9,26	17,7	25,02	30,06	36,3

Таблица 9

Пример результатов вычислений

Характеристики и элементы судна		Характеристики носового бульба	
P_g , т	70 000	L_{pr} , м	4,79
V_s , уз.	14,00	B_b , м	3,92
D , т	87 076	H_b , м	4,74
DW , т	76 553	A_{br} , м	48,32
L , м	216,6	Характеристики гребного винта	
B , м	35,1	D_p , м	7,70
T , м	13,8	P/D	0,975
H , м	19,02	A_e/A_0	0,560
C_b	0,846	Характеристики главного двигателя	
C_m	0,993	Тип ГД	WARTSILA SULZER
C_{wp}	0,846	Модель ГД	5RTA58T
Экономические показатели		n , об/мин.	103
K , млн. долл.	41,56	$N_{\text{сд}}$, кВт	10000
TRC , долл./т	6,80	W_m , т	280
A , млн долл.	12,46	Количество циклов	2

Из анализа результатов вычислений, представленных на рис. 12, 13, и данных табл. 5–8 следует, что расчетные значения главных размерений и основных проектных характеристик в полной мере согласуются с данными судов-прототипов, находящихся в эксплуатации. Таким образом, разработанная математическая модель и созданная на ее основе программа для ЭВМ могут использоваться на начальных стадиях проектирования для предварительных расчетов главных размерений и характеристик грузовых судов (балкеры, танкеры, контейнеровозы и универсальные сухогрузные суда), а также в целях сравнительной оценки их функциональной эффективности в заданных условиях эксплуатации. Кроме того, интеграция разработанной математической модели со специализированными программными продуктами, предназначенными для корпусного моделирования (например, Orca3D, FastShip, MaxSurf и др.), позволит связать результаты расчетов и трехмерную параметризованную модель корпуса судна.

Заключение

В статье рассмотрена математическая модель, предназначенная для автоматизации расчетов, выполняемых на начальных стадиях проектирования морских грузовых судов (танкеры,

балкеры, контейнеровозы и универсальные сухогрузы). В результате анализа данных судов-прототипов получены формулы для расчета главных размерений.

В расчетах ходкости учитываются характеристики формы корпуса и носового бульба, погруженного транца и выступающих частей. Характеристики главного двигателя выбираются из созданной базы данных современных двигателей. Приводятся результаты тестовых расчетов и их сравнение с данными судов-прототипов.

Математическая модель реализована в виде программы для ЭВМ и может использоваться на начальных этапах проектирования для автоматизации расчетов главных размерений и характеристик судов, а также в целях сравнительной оценки их функциональной эффективности на различных направлениях перевозок.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Войткунский Я.И. Иванов А.Н., Луговский В.В. Справочник по теории корабля: Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. Ленинград: Судостроение, 1985. 764 с.
2. Максимаджи А.И. Капитану о прочности корпуса судна: справочник. Ленинград: Судостроение, 1988. 224 с.
3. Мацкевич В.А., Мацкевич А.В. Практическое проектирование транспортных судов. В 2 ч. Москва: Недра, 2015. Ч. 1. 194 с.
4. Мацкевич В.А., Мацкевич А.В. Практическое проектирование транспортных судов. В 2 ч. Москва: Недра, 2015. Ч. 2. 168 с.
5. Правила классификации и постройки морских судов. Часть IV. Остойчивость. Санкт-Петербург, 2022. 80 с.
6. Российский морской регистр судоходства. URL: <https://lk.rs-class.org> (дата обращения: 23.05.2022).
7. Соколов В.П. Постановка задач экономического обоснования судов. Ленинград: Судостроение, 1987. 162 с.
8. A comprehensive A-Z listing of marine diesel engines in excess of 300 kW. The definitive guide to marine engines. 2005. 39 p.
9. Age distribution of the world merchant fleet in 2019-2020, by vessel type. URL: <https://www.statista.com/statistics/1102442/age-of-world-merchant-fleet-by-vessel-type> – 23.05.2022.
10. American Bureau of Shipping. URL: <https://www.eagle.org> – 23.05.2022.
11. Emission Control Areas (ECAs). URL: <https://www.imo.org> – 23.05.2022.
12. Holtrop J., Mennen G.G.J. An approximate power prediction method. *International Shipbuilding Progress*. 1982;29(335):166–170.
13. Kracht A.M. Design of Bulbous Bows. *Transactions SNAME*. 1978;86:197–217.
14. Benford H. A naval architect's guide to practical economics. Department of naval architecture and marine engineering University of Michigan. 1991. 134 p.
15. Misra S.C. Design Principles of Ships and Marine Structures. CRC Press, Taylor & Francis Group, Florida, United States, 2015. 500 p.
16. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power. Cambridge, Cambridge University Press, 2011. 568 p.
17. Number of ships in the world merchant fleet as of January 1, 2021, by type. URL: <https://www.statista.com> – 23.05.2022.
18. Papanikolaou A., Ship design: methodologies of preliminary design. SPRINGER, 2014. 628 p.
19. Sharma R., Sha O.P. Practical Hydrodynamic Design of Bulbous Bows for Ships. *Naval Engineers Journal*. 2005;117(1):57–76.
20. UNCTAD Handbook of Statistics. URL: <https://hbs.unctad.org/merchant-fleet> – 23.05.2022.
21. Ventura M. Estimation methods for basic ship design. MSc in marine engineering and naval architecture ship design. Part 1. Lecture notes. 2004. 51 p.
22. Vessel register for DNV. URL: <https://vesselregister.dnv.com> – 23.05.2022.

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/42-58>

Kitaev M., Tyuftyaev D., Tortyzheva D.

MAKSIM V. KITAEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
kitaev.mv@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5345-6333>

DMITRY V. TYUFTYAEV, Student, tyuftyaev.dv@students.dvfu.ru

DARYA A. TORTYZHEVA, Student, tortyzheva.da@students.dvfu.ru

Polytechnic Institute

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Mathematical model for cargo vessel design

Abstract. The article considers a mathematical model designed to automate calculations performed at the initial stages of designing marine cargo ships (tankers, bulk carriers, container ships and universal dry cargo ships). To determine the main dimensions and coefficients of completeness in the model, formulas are used, the results of a statistical analysis of the data of modern prototype ships. In the calculation of propulsion using the Holtrop method, the features of the contours and shape of the hull, the characteristics of the nasal bulb are taken into account. To determine the hydrodynamic and geometric characteristics of the propeller, approximating polynomials are used, obtained for the thrust and moment coefficients of propellers of the B-series. The characteristics of the main engine are selected according to a special algorithm from the database of marine diesel engines produced both in our country and abroad, created by the authors. The main indicators of stability and strength of the designed ships are calculated. The initial data are speed, carrying capacity and quantities characterizing the conditions for the design, construction and operation of ships. The results include the main dimensions and coefficients of completeness, displacement and load components, construction cost and economic indicators of functional efficiency. Functional efficiency and economic indicators are evaluated taking into account the design life of the vessel and inflation. The mathematical model is implemented as a computer program and can be used at the initial stages of design to automate calculations and express assessment of the characteristics, elements and economic efficiency of candidate ships for given lines of operation.

Keywords: ship design, mathematical model, computational automation, functional efficiency, economic indicators

For citation: Kitaev M., Tyuftyaev D., Tortyzheva D. Mathematical model for cargo vessel design. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):42–58. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Voytkunsky Ya.I. Ivanov A.N., Lugovsky V.V. Handbook of ship theory. Vol. 1. Hydromechanics. Resistance to the movement of ships. Ship movers. Leningrad, Shipbuilding, 1985. 764 p. (In Russ.).
2. Maksimadzhi A.I. To the captain about the strength of the ship's hull: a Handbook. Leningrad, Shipbuilding, 1988. 224 p. (In Russ.).
3. Matskevich V.A., Matskevich A.V. Practical design of transport ships. In 2 parts. Moscow, Nedra, 2015. Part 1. 194 p. (In Russ.).
4. Matskevich V.A., Matskevich A.V. Practical design of transport ships. In 2 parts. Part 2. Moscow, Nedra, 2015. 168 p. (In Russ.).
5. Rules for the classification and construction of ships. Part IV. Stability. St. Petersburg. 2022. 80 p. (In Russ.).
6. Russian Maritime Register of Shipping. URL: <https://lk.rs-class.org> – 23.05.2022. (In Russ.).
7. Sokolov V.P. Statement of tasks of economic substantiation of courts. Leningrad, Shipbuilding, 1987. 162 p. (In Russ.).

8. A comprehensive A-Z listing of marine diesel engines in excess of 300 kW. The definitive guide to marine engines. 2005. 39 p.
9. Age distribution of the world merchant fleet in 2019-2020, by vessel type. URL: <https://www.statista.com/statistics/1102442/age-of-world-merchant-fleet-by-vessel-type> – 23.05.2022.
10. American Bureau of Shipping. URL: <https://www.eagle.org> – 23.05.2022.
11. Emission Control Areas (ECAs). URL: <https://www.imo.org> – 23.05.2022.
12. Holtrop J., Mennen G.G.J. An approximate power prediction method. *International Shipbuilding Progress*. 1982;29(335):166–170.
13. Kracht A.M. Design of Bulbous Bows. *Transactions SNAME*. 1978;86:197–217.
14. Benford H. A naval architect's guide to practical economics. Department of naval architecture and marine engineering University of Michigan. 1991. 134 p.
15. Misra S.C. Design Principles of Ships and Marine Structures. CRC Press, Taylor & Francis Group, Florida, United States, 2015. 500 p.
16. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power. Cambridge, Cambridge University Press, 2011. 568 p.
17. Number of ships in the world merchant fleet as of January 1, 2021, by type. URL: <https://www.statista.com> – 23.05.2022.
18. Papanikolaou A., Ship design: methodologies of preliminary design. SPRINGER, 2014. 628 p.
19. Sharma R., Sha O.P. Practical Hydrodynamic Design of Bulbous Bows for Ships. *Naval Engineers Journal*. 2005;117(1):57–76.
20. UNCTAD Handbook of Statistics. URL: <https://hbs.unctad.org/merchant-fleet> – 23.05.2022.
21. Ventura M. Estimation methods for basic ship design. MSc in marine engineering and naval architecture ship design. Part 1. Lecture notes. 2004. 51 p.
22. Vessel register for DNV. URL: <https://vesselregister.dnv.com> – 23.05.2022.