УДК 629.12
DOI: 10.37890/jwt.vi88.722

# Обоснование математической модели выбора основных элементов сухогрузного судна

**И.Д. Степанов**
*ORCID: 0009-0007-4154-8338*
**Е.М. Грамузов**
*ORCID: 0000-0003-1549-2063*
*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия*

**Аннотация.** В статье представлена математическая модель проектирования сухогрузных судов, позволяющая на ранних стадиях разработки проекта определять оптимальные значения основных характеристик судна с учётом условий эксплуатации и нормативных требований Российской Федерации. Разработка модели для сухогрузных судов обусловлена необходимостью сокращения сроков проектирования судна, снижения стоимости проектных работ, объективной оценки влияния проектных параметров на эксплуатационные качества судна, а также автоматизации поиска решений в условиях множества ограничений. В работе детально рассмотрены допущения при построении модели, включая идеализированные условия движения и особенности расчёта ходкости. Особое внимание уделено ограничениям, характерным для эксплуатации сухогрузных судов в Российской Федерации: габаритам гидротехнических сооружений (шлюзов, мостов), глубинам фарватеров, требованиям классификационных обществ, сезонным и гидрологическим условиям. Представлены аналитические зависимости, используемые в процессе проектирования, с расшифровкой содержащихся в них величин. В их число входят: уравнение плавучести, уравнение масс (с детализацией по составляющим водоизмещения), уравнение ходкости (определение сопротивления и потребной мощности), уравнение остойчивости и уравнение вместимости. Разработанная модель выступает эффективным инструментом для обоснованного выбора проектных решений, обеспечивая баланс технических, экономических и эксплуатационных требований при проектировании сухогрузных судов.

**Ключевые слова:** Сухогрузное судно, математическая модель, уравнения плавучести, уравнение масс, уравнение ходкости, уравнение остойчивости, уравнение вместимости

# Justification of the mathematical model for selecting the main elements of a dry cargo vessel

**Igor D. Stepanov**
*ORCID: 0009-0007-4154-8338*
**Evgeny M. Gramuzov**
*ORCID: 0000-0003-1549-2063*
*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** This article presents a mathematical model for the design of dry cargo vessels. This model allows early determination of optimal values of key vessel characteristics, taking into account operating conditions and regulatory requirements of the Russian Federation. The development of this model for dry cargo vessels is driven by the need to reduce design time, to lower design costs, to objectively assess the impact of design parameters on vessel performance, and to automate the search for solutions under multiple constraints. The paper examines in detail the assumptions used in constructing the model, including idealized traffic conditions and performance calculation features. Particular attention is paid to constraints specific to the operation of dry cargo vessels in the Russian Federation: the dimensions of

hydraulic structures (locks, bridges), channel depths, classification society requirements, and seasonal and hydrological conditions. The analytical relationships used in the design process are presented, along with the explanation of the values they contain. These include buoyancy equation, mass equation (with details on displacement components), propulsion equation (determination of resistance and required power), stability equation, and capacity equation. The developed model serves as an effective tool for design decisions, ensuring the balance of technical, economic, and operational requirements in the design of dry cargo vessels.

**Keywords:** dry cargo ship, mathematical model, buoyancy equations, mass equation, speed equation, stability equation, capacity equation

## Введение

Разработка сухогрузных судов представляет собой сложную многопараметрическую задачу, в рамках которой необходимо согласованно учитывать целый ряд аспектов — технических, эксплуатационных и экономических. Классические подходы к проектированию, базирующиеся на затратных модельных экспериментах в опытовых бассейнах, всё чаще вытесняются аналитическими методами оптимизации, опирающимися на возможности математического моделирования.

Математическое моделирование при проектировании сухогрузных судов становится особенно востребованным благодаря трём обстоятельствам: необходимости уменьшать длительность и себестоимость проектирования; важности получения объективных оценок влияния варьируемых параметров на эксплуатационные качества судна; а также возможности автоматически находить наилучшие проектные решения при наличии целого спектра ограничений.

## 1. Структура математической модели проектирования

Под математической моделью принято понимать такую совокупность соотношений (включающую уравнения, неравенства и функциональные зависимости), которая позволяет вычислить величину критерия оптимизации при любом заданном наборе оптимизируемых параметров.

Разработка сухогрузных судов сопряжена с рядом специфических особенностей, которые отличают этот процесс от создания прочих гражданских водоизмещающих судов. До недавнего времени формирование обводов для сухогрузов осуществлялось главным образом посредством дорогостоящих экспериментов на моделях, проводимых в опытовых бассейнах [1]. Вместе с тем, последние результаты, полученные в сфере изучения ходкости, создали предпосылки для внедрения аналитических оптимизационных процедур в процесс разработки обводов судов данного типа. Принимая во внимание тесную корреляцию формы корпуса с основными конструктивными характеристиками, была разработана математическая модель, ориентированная на проектирование сухогрузного судна [2, 8].

Математическая модель включает:

1). Совокупность исходных данных, регламентированных техническим заданием на разработку проекта сухогрузного судна (полезная грузоподъёмность, скорость хода, класс судна, район плавания, автономность, численность экипажа и прочие), согласно [7]:

$$\bar{C}(c_1, c_2, \dots, c_n)\bar{C}(c_1, c_2, \dots, c_n) \qquad (1.1)$$

2). Совокупность искомых характеристик, выступающих в роли оптимизируемых параметров проекта (главные размерения, коэффициенты полноты, параметры компоновки, водоизмещение, мощность энергетической установки, а также форма

корпуса сухогрузного судна, описываемая соответствующими коэффициентами формы):

$$\overline{\mathrm{X}}(\mathrm{x}_1, \mathrm{x}_2, \dots, \mathrm{x}_\mathrm{n})\overline{\mathrm{X}}(\mathrm{x}_1, \mathrm{x}_2, \dots, \mathrm{x}_\mathrm{n}) \quad (1.2)$$

3). Система ограничений, в состав которой входят аналитические зависимости, применяемые при проектировании сухогрузного судна (уравнение масс, уравнение плавучести, уравнение остойчивости, уравнение вместимости, уравнение ходкости):

$$\mathrm{G_j}(\overline{\mathrm{X}}, \overline{\mathrm{C}}) \geq \mathrm{A_j} \quad \mathrm{j} = 1, \dots, \mathrm{m} \quad (1.3)$$

Функция $G_j$ представляет собой оценки j-х качеств судна, а функции $\mathrm{A_j}$ - требования к этим качествам.

4) Ограничения, накладываемые на элементы вектора искомых характеристик (осадка, ширина корпуса, высота надводного борта и прочие):

$$x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max} \quad (1.4)$$

При корректно сформулированном техническом задании может существовать несколько векторов x, отвечающих условиям (1.3) и (1.4). Данное обстоятельство указывает на наличие ряда проектных альтернатив, удовлетворяющих установленным требованиям. С целью идентификации оптимального варианта в рассмотрение вводится целевая функция.

5) Целевую функцию:

$$ExtrZ(\overline{\mathrm{X}}, \overline{\mathrm{C}}) \quad (1.5)$$

## 2. Исходные данные и допущения при построении математической модели

Построение любой математической модели проектирования базируется на двух основополагающих источниках: техническом задании, предъявляемом заказчиком, и совокупности аналитических уравнений, формализующих процесс проектирования. При разработке подобной модели приходится прибегать к определённым упрощениям и вводить ряд ограничений, которые, тем не менее, не вносят принципиальных искажений в поведение реального физического объекта. В окончательную математическую модель судна включаются исключительно те уравнения и неравенства, которые описывают свойства, оказывающие определяющее влияние на реализацию судном своего функционального назначения и в то же время воздействующие на искомые оптимизируемые параметры.

Применительно к сухогрузным судам в фундамент модели было положено допущение о перемещении судна в идеализированной среде, для которой разработаны апробированные методики определения ходкости. Собственно модель опирается на конкретные расчётные процедуры, дающие возможность установить, каким образом варьирование изменяемых параметров отражается на ходкости сухогруза.

В ряду эксплуатационных качеств сухогрузного судна значимую позицию занимает маневренность, охватывающая три компонента: устойчивость на курсе, поворотливость и инерционные свойства. Данные практических наблюдений свидетельствуют, что все современные сухогрузы обладают эксплуатационной устойчивостью на курсе. Поворотливость же приобретает особую значимость при эксплуатации судна в стеснённых акваториях. В пределах отношений длины к ширине, типичных для речных и морских сухогрузов, поворотливость обусловливается преимущественно маневренными характеристиками пропульсивной установки, а также свойствами движительно-рулевого комплекса. Инерционные качества, со своей стороны, определяются в первую очередь маневренностью

энергетической установки. Отсюда следует, что маневренные характеристики сухогруза демонстрируют слабую корреляцию с оптимизируемыми параметрами и не должны оказывать воздействия на их выбор.

Вместимость сухогрузного судна выступает в качестве определяющего фактора при назначении проектных характеристик. Именно рыночные требования — род перевозимого груза и соображения экономической эффективности — диктуют оптимальное соотношение главных размерений, мощности судовой энергетической установки, скорости хода и стоимости судна. На стадии выбора проектных параметров, кроме того, требуется проведение расчётов начальной остойчивости, осадки и дифферента. От результатов этих расчётов зависят мореходные качества судна, его способность к оптимальной загрузке и, как следствие, экономическая эффективность.

В качестве движителей на сухогрузах применяются четырёхлопастные гребные винты фиксированного шага, работающие в направляющих насадках.

Применение килеватости днища для рассматриваемого типа судов признаётся нецелесообразным. Обоснование сводится к следующему: при равных значениях водоизмещения, длины и ширины корпуса судно, обладающее килеватостью днища, неизбежно характеризуется увеличенной осадкой в сопоставлении с судном, не имеющим киля. Наконец, в процессе проектирования сухогрузов, предназначаемых для эксплуатации в речных и морских акваториях Российской Федерации, в обязательном порядке надлежит принимать во внимание район предстоящего плавания.

Проектирование сухогрузов, предназначенных для работы на водных путях России (реки, моря, смешанные маршруты «река-море»), сопряжено с необходимостью учёта комплекса жёстких ограничений — от инфраструктурных параметров водных путей до требований классификационных обществ и природоохранного законодательства. Рассмотрим ключевые группы ограничений, определяющих допустимые значения главных размерений, грузоподъёмности, мореходных и эксплуатационных качеств судна.

Прежде всего, габариты судна жёстко лимитируются размерами гидротехнических сооружений и особенностями фарватеров. Длина сухогруза должна соответствовать длине шлюзовых камер, доков и причалов, а также обеспечивать возможность маневрирования на извилистых участках.

При проектировании судов в основу ложатся шлюзы Волго-Донского канала, которые имеют длину 145 м [3], что фактически задаёт верхний предел для судов, планирующих прохождение по этому маршруту.

Ширина судна не может превышать ширину шлюзов (для Волго-Донского канала — 17,88 м), пролётов мостов и минимальных радиусов поворота в фарватере.

Высота надводного габарита ограничивается высотой мостовых переходов и иных надводных сооружений: так, на участке реки Дон (2588,6–2875,5 км) максимально допустимая высота составляет 14 м, а на реке Москва (191,5–200,0 км) — 10,4 м [9].

Осадка судна является одним из наиболее критичных параметров, поскольку напрямую зависит от глубин на маршруте. На речных участках осадки часто вводятся временные ограничения, особенно в периоды меженного стока. Например, на Волге (участок Городец — Нижний Новгород) в периоды обмеления администрация бассейна публикует ежедневные радиобюллетени с допустимыми значениями осадки. В морских портах осадка ограничена глубинами у причалов и в акватории; для судов с большой осадкой может потребоваться ледокольное или буксирное сопровождение. Во всех случаях необходимо обеспечивать минимальные запасы под днищем (обычно 0,3–0,5 м) с учётом типа грунта и местных регламентов.

Грузоподъёмность и вместимость сухогруза также подчиняются строгим ограничениям. Так, Волго-Донской канал рассчитан на суда грузоподъёмностью до 7 000 тонн. На речных маршрутах максимальная загрузка определяется сочетанием

осадки, габаритов шлюзов и прочности причальных сооружений. Вместимость трюмов должна быть согласована с типом перевозимого груза (навалочные, генеральные грузы) и требованиями к остойчивости.

Скорость движения и манёвренные характеристики также подвержены регламентации [4]. На речных участках установлены дифференцированные ограничения: для судов грузоподъёмностью свыше 3 000 т — не более 7 км/ч; для судов 2 000–3 000 т — не более 8 км/ч; для судов менее 2 000 т — не более 11 км/ч. В зонах причалов, портов, пляжей и населённых пунктов скорость обычно ограничивается 12–15 км/ч. Манёвренные параметры (диаметр циркуляции, время торможения) должны гарантировать безопасное движение в узких фарватерах и при шлюзовании.

Таким образом, проектирование сухогруза для эксплуатации в РФ требует комплексного учёта: инфраструктурных лимитов (габариты шлюзов, мостов, глубины); нормативных требований (правила РРР, РМРС, КТМ, технические регламенты); сезонных и гидрологических условий (обмеление, ледовая обстановка); эксплуатационных ограничений (скорость, манёвренность, грузоподъёмность).

### 3. Аналитические уравнения проектирования

В основу математической модели были положены перечисленные ниже уравнения проектирования: уравнение плавучести, уравнение масс, уравнение ходкости, уравнение остойчивости, уравнение вместимости [5].

1. Уравнения плавучести не отличается от общепринятой формы записи:

$$D = k_{\text{в}}\rho\delta LBT, \tag{3.1}$$

где $k_{\text{в}}$ − коэффициент выступающих частей ($k_{\text{в}} \leq 1{,}03$); ρ − плотности морской воды ρ=1,025; δ − коэффициент общей полноты судна; $L$ − расчетная длина проектируемого
судна, м; $B$ − расчетная ширина проектируемого судна, м; $T$ − расчетная осадка проектируемого судна, м.

2. Уравнение масс.

Водоизмещение судна, $D$, т, включает в себя водоизмещение порожнего судна $D_{\text{пор}}$ , т, и дедвейт $DW$, т [6].

$$D = D_{\text{пор}} + DW, \tag{3.2}$$

Водоизмещение судна порожнем подразделяется на разделы масс и представляется в следующей форме:

$$D_{\text{пор}} = P_k + P_y + P_{cc} + P_M + P_{\text{эл}} + P_{\text{в}} + P_{\text{з}} + P_{\text{пос.груз}} + P_{\text{сн}} + P_{\text{зв}}, \tag{3.3}$$

где $P_k$ − масса корпуса; $P_y$ − масса судовых устройств; $P_{cc}$ − масса судовых систем; $P_M$ − масса энергетической установки; $P_{\text{эл}}$ − масса электроэнергетической системы, внутрисудовой связи и управления; $P_{\text{в}}$ − масса вооружения; $P_{\text{з}}$− масса запасных частей; $P_{\text{пос.груз}}$ − масса постоянных жидких грузов; $P_{\text{сн}}$ − масса снабжения, имущества; $P_{\text{зв}}$ − запас водоизмещения.

Разделы масс $P_k$, $P_y$, $P_{cc}$, $P_{\text{эл}}$, $P_{\text{в}}$, $P_{\text{з}}$, $P_{\text{пос.груз}}$, $P_{\text{сн}}$ можно определить по формуле:

$$P_i = p_i LBH, \tag{3.4}$$

где $P_i$ − измеритель масс соответствующего раздела, определенный по судну-прототипу.

Масса энергетической установки $P_M$ и запас водоизмещения $P_{\text{зв}}$ можно определить по следующим формулам:

$$P_M = p_M N_e, \tag{3.5}$$

$$P_{\text{зв}} = p_{\text{зв}} D_{\text{пор}}, \tag{3.6}$$

Таким образом, получим:

$$D_{\text{пор}} = \left(P_k + P_y + P_{cc} + P_{\text{эл}} + P_{\text{в}} + P_{\text{з}} + P_{\text{пос.груз}} + P_{\text{сн}}\right) LBH + p_M N_e + p_{\text{зв}} D_{\text{пор}}, \tag{3.7}$$

или:

$$D_{\text{пор}} = p_{\text{ко}} LBH + p_M N_e + p_{\text{зв}} D_{\text{пор}}, \tag{3.8}$$

$$D_{\text{пор}} = \frac{p_{\text{ко}} LBH + p_M N_e}{1 - p_{\text{зв}}}, \tag{3.9}$$

Дедвейт *DW* сухогрузного судна включает следующие разделы:

$$DW = P_{\text{эк}} + P_{\text{т}} + P_{\text{жг}}, \tag{3.10}$$

где $P_{\text{эк}}$ – масса экипажа, провизии, воды, расходных материалов; $P_{\text{т}}$ – запас топлива, масла, воды; $P_{\text{жг}}$ – масса переменных жидких грузов.

Масса экипажа, провизии, воды, расходных материалов $P_{\text{эк}}$:

$$P_{\text{эк}} = P_{\text{э}} + P_{\text{пр}} + P_{\text{в}} + P_{\text{отбр}}, \tag{3.11}$$

где $P_{\text{э}}$ – масса экипажа, т; $P_{\text{пр}}$ – масса провизии, т; $P_{\text{в}}$ – масса воды для экипажа, т; $P_{\text{отбр}}$ – масса пищевых и твердых отбросов, т.

Масса экипажа находится по формуле:

$$P_{\text{э}} = m_{\text{э}} n_{\text{э}}, \tag{3.12}$$

где $m_{\text{э}} = 0{,}12$ – масса одного человека с багажом, т; $n_{\text{э}}$ – численность экипажа проектируемого судна, чел.

Масса провизии:

$$P_{\text{пр}} = p_{\text{пр}} n_{\text{э}} \text{A}, \tag{3.13}$$

где $p_{\text{пр}} = 4 * 10^{-3}$ – суточная норма провизии на одного человека, $\frac{\text{т}}{\text{чел}*\text{сут}}$; A – автономность судна, сут.

Масса воды для экипажа:

$$P_{\text{в}} = p_{\text{в}} n_{\text{э}} \text{A}, \tag{3.14}$$

где $p_{\text{в}} = 0{,}1$ – норма воды на одного человека в сутки, $\frac{\text{т}}{\text{чел}*\text{сут}}$.

Масса пищевых и твердых отбросов:

$$P_{\text{отбр}} = p_{\text{отбр}} n_{\text{э}} \text{A}, \tag{3.15}$$

Где $p_{\text{отбр}} = 1{,}2 * 10^{-3}$ – норма отбросов одного человека в сутки, $\frac{\text{т}}{\text{чел}*\text{сут}}$;

Таким образом, получим:

$$P_{эк} = m_э n_э + p_{пр} n_э A + p_в n_э A + p_{отбр} n_э A \quad (3.16)$$

или:

$$P_{эк} = n_э A \left( \frac{m_э}{A} + p_{пр} + P_в + P_{отбр} \right) \quad (3.17)$$

Запас топлива, масла, воды $P_т$:

$$P_т = p_т k_1 k_2 N t, \quad (3.18)$$

Где $p_т$ – удельный расход топлива, $\frac{т}{кВт*ч}$; $k_1 = 1{,}15$ – коэффициент морского запаса;

$k_2 = 1{,}15$ – коэффициент, учитывающий увеличение расхода топлива на работы вспомогательных механизмов, на запасы смазки и питательной воды, на стояночные режимы; $t$= 24А – автономность судна, ч.

Масса переменных жидких грузов:

$$P_{жг} = P_{зг} + P_{зп}, \quad (3.19)$$

где $P_{зг}$ – масса запасных грузов для передачи аварийным судам, т; $P_{зп}$ – масса загрязненных и подсланевых вод, т.

$$P_{зп} = p_{зп} n_э A, \quad (3.20)$$

где $p_{зп} = 0{,}15$ – масса загрязненных и подсланевых вод одного человека в сутки, $\frac{т}{чел*сут}$.

Таким образом, получим:

$$DW = n_э A \left( \frac{m_э}{A} + p_{пр} + P_в + P_{отбр} \right) + p_т k_1 k_2 N t 24A + P_{зг} + p_{зп} n_э A.$$

3. Уравнение ходкости.

Приближённое определение полного сопротивления движению судна может быть выполнено согласно выражению [2]:

$$R = R_{тр} + R_{ост}, \quad (3.21)$$

где $R_{тр}$ – сопротивление трения; $R_{ост}$– остаточное сопротивление.

Сопротивление трения можно определить с помощью следующего выражения [2]:

$$R_{тр} = (\xi_{mn} + \xi_ш + \xi_{вч}) \frac{\rho v^2}{2} \Omega, \quad (3.22)$$

где $\xi_{mn}$ – коэффициент трения эквивалентной гладкой пластины; $\xi_ш$ – надбавка на шероховатость; $\xi_{вч}$– надбавка выступающие части; $\Omega$ – смоченная поверхность корпуса судна; $v$ – скорость судна, м/с.

Коэффициент трения эквивалентной гладкой пластины можно определить по формуле [2]:

$$\xi_{mn} = \frac{0{,}455}{(lgRe)(lgRe)^{2{,}58}}, \quad (3.23)$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{vL}{v}, \quad (3.24)$$

где $v$ – скорость судна, м/с; $L$ − длина судна, м; $\nu = 1{,}15 * 10^{-6}\ \frac{м^2}{с}$ – коэффициент кинематической вязкости воды.

Смоченная поверхность корпуса судов с большими значениями коэффициента общей полноты δ можно определить по приближенной формуле В.А. Семеки [5]:

$$\Omega_0 = LT\{2 + 1{,}37(\delta - 0{,}274)\,{}^{B}/_{T}\}, \tag{3.25}$$

Остаточное сопротивление определяется по формуле:

$$R_{ост} = \zeta_{ост}\frac{\rho v^2}{2}\Omega, \tag{3.26}$$

где $\zeta_{ост}$– коэффициент остаточного сопротивления, для форм корпусов с коэффициентами полноты $\delta \geq 0{,}800$ определяется по формуле [2]:

$$\zeta_{ост} = \frac{2{,}15\delta^3 Fr^{\frac{2}{3}}}{\left(\frac{L}{B}\right)^2 * \left(\frac{B}{T}\right)^{0{,}5}} \tag{3.27}$$

Число Фруда:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}, \tag{3.28}$$

где $v$ – скорость судна, м/с; $L$ − длина судна, м; $g$ − свободное ускорение, $\frac{м^2}{с}$.

Буксировочная мощность определяется по формуле:

$$N_R = Rv, \tag{3.29}$$

Мощность главной ЭУ судна определяется по формуле:

$$N_e = \frac{N_R}{\eta_S \eta_D}, \tag{3.30}$$

где $\eta_S$ − КПД передачи мощности, принятый равен 0,97; $\eta_D$− пропульсивный коэффициент, принятый равен 0,7.

4. Уравнение остойчивости.

На начальных стадиях проектирования, когда главные элементы судна уже установлены, однако теоретический чертёж пока не разработан, уравнение остойчивости представляется в виде, традиционно используемом в теории проектирования судов [2]:

$$h = \frac{\alpha^2}{11{,}4\delta}\frac{B^2}{T} + 0{,}5\left(\frac{\alpha}{\delta}\right)^{0{,}5} T - z_g, \tag{3.31}$$

где, $h$ − абсолютная метацентрическая высота судна, м; $B$, $T$ − главные размерения судна, м; α − коэффициент полноты площади ГВЛ; δ − коэффициент общей полноты судна; $z_g$ – аппликата центра тяжести судна.

5. Уравнение вместимости.

Уравнение вместимости может быть представлено следующим образом:

$$W_{\text{ф}} = \sum W_i, \tag{3.32}$$

где $\sum W_i$ – сумма потребных теоретических объемов, м$^3$; $W_{\text{ф}}$– фактическая вместимость корпуса и надстроек, м$^3$.

В.Л. Поздюниным была введена обобщенная запись левой части уравнения вместимости [2]:

$$W_{\text{ф}} = W_{\text{к}}(1 + s_{\text{н}}), \tag{3.33}$$

где $s_{\text{н}}$ − коэффициент развития надстроек (отношение объемов надстроек (рубок) и корпуса); $W_{\text{к}}$ – объем корпуса, м$^3$.

Объем корпуса определяется по формуле [2]:

$$W_{\text{к}} = k_c \frac{D}{\rho}\left(\frac{H}{T}\right)^{\frac{\alpha}{\delta}}, \tag{3.34}$$

где $k_c$– коэффициент седловатости; $\rho$ − плотность воды.

Формула для определения фактической вместимости судна имеет вид:

$$W_{\text{ф}} = k_c(1 + s_{\text{н}})\frac{D}{\rho}\left(\frac{H}{T}\right)^{\frac{\alpha}{\delta}}. \tag{3.35}$$

**Заключение**

В ходе исследования разработана математическая модель проектирования сухогрузных судов, позволяющая на ранних стадиях проекта определять оптимальные значения основных характеристик судна с учётом заданных условий эксплуатации и нормативных требований. Основные элементы судна определяются путём совместного решения уравнений математической модели. Таким образом, предложенная математическая модель представляет собой эффективный инструмент для решения задач проектирования сухогрузных судов, обеспечивающий обоснованный выбор проектных характеристик на ранних стадиях разработки.

**Список литературы**


1. Овчинников К.Д., Белая А.Б. Оценка ходовых качеств водоизмещающих транспортных судов на начальных стадиях проектирования: учебное пособие, г. Санкт-Петербург. СПбГМТУ. 2024, 192 с.
2. Гайкович, А. И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. Том 2. Анализ и синтез системы «Корабль». – СПб.: Издательство НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. – 872 с.
3. Волго-Донской канал (Волго-Дон) – URL: https://www.locman.net/volgodon.htm.
4. Приказ Министерства транспорта РФ от 24 июля 2018 г. N 270 «Об утверждении Правил движения и стоянки судов в Волго-Донском бассейне внутренних водных путей Российской Федерации».
5. Зуев В.А., Калинина Н.В., Рабазов Ю.И. Выбор основных характеристик морских транспортных судов на начальной стадии проектирования: учеб. пособие / В.А. Зуев, Н.В. Калинина, Ю.И. Рабазов; Нижегород. гос. техн. ун-т. Нижний Новгород, 2012. - 225 с.
6. Грамузов Е. М. Определение основных характеристик спасательного судна методом совместного решения уравнений теории проектирования / Е. М. Грамузов, В. К. Май // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2013. - №3(22). - С. 25-33. DOI: 10.21821/2309-5180-2013-5-3-25-33.
7. Грамузов Е. М. Обоснование проектных характеристик речных ледоколов / Е. М. Грамузов, Н. Е. Тихонова // Тр. НГТУ. — Н. Новгород, 2013. — № 3.

8. Калинина Н.В. Теоретико-экспериментальный подход к прогнозированию ледовой ходкости при движении судов набегами // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 15—24.
9. ФБУ «Администрация «Волго-Дон»– URL: https://vdgbu.ru.

**References**

1. Ovchinnikov K.D., Belaya A.B. Assessment of the Performance of Displacement Transport Vessels at the Initial Stages of Design: Textbook, St. Petersburg. SPbGMTU. 2024, 192 p.
2. Gaikovich, A. I. Theory of Design of Displacement Ships and Vessels. Volume 2. Analysis and Synthesis of the Ship System. – St. Petersburg: Publishing House of NITs MORTINTECH, 2014. – 872 p.
3. Volga-Don Canal (Volgo-Don) – URL: https://www.locman.net/volgodon.htm.
4. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated July 24, 2018, No. 270 «On Approval of the Rules for the Movement and Parking of Vessels in the Volga-Don Basin of the Inland Waterways of the Russian Federation».
5. Zuev V.A., Kalinina N.V., Rabazov Yu.I. Selection of the main characteristics of sea transport vessels at the initial design stage: textbook / V.A. Zuev, N.V. Kalinina, Yu.I. Rabazov; Nizhny Novgorod. state tech. university. Nizhny Novgorod, 2012. - 225 p.
6. Gramuzov E. M. Determination of the main characteristics of a rescue vessel by the method of joint solution of design theory equations / E. M. Gramuzov, V. K. May // Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. - 2013. - No. 3 (22). - P. 25-33. DOI: 10.21821/2309-5180-2013-5-3-25-33.
7. Gramuzov E. M. Justification of the design characteristics of river icebreakers / E. M. Gramuzov, N. E. Tikhonova // Proceedings of NSTU. - N. Novgorod, 2013. - No. 3.
8. Kalinina N.V. Theoretical and experimental approach to forecasting ice performance during ship movements in increments // Marine intellectual technologies. 2025. No. 4 part 2, pp. 15-24.
9. Federal State Budgetary Institution «Volga-Don Administration» - URL: https://vdgbu.ru.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Степанов Игорь Дмитриевич**, аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева), 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, email: igor.d.stepanov@mail.ru

**Igor D. Stepanov**, postgraduate student, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NSTU n.a. R.E. Alekseev), Minina, 24, Nizhny Novgorod, 603155

**Грамузов Евгений Михайлович,** д.т.н., профессор кафедры кораблестроение и авиационная техника, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева), 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, email: terkor54@mail.ru

**Evgeny M. Gramuzov,** Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Shipbuilding and Aviation Technology», Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NSTU n.a. R.E. Alekseev), Minina, 24, Nizhny Novgorod, 603155

Статья поступила в редакцию 06.04.2026; принята к публикации 22.06.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 06.04.2026; published online 20.09.2026.