

Научная статья

УДК 629.562

DOI 10.46845/1997-3071-2022-67-71-86

Обоснование и выбор основных характеристик малого рыболовного судна с большой полнотой корпуса

**Евгений Андреевич Чуреев¹, Дмитрий Александрович Романюта²,
Виктор Андреевич Белоусов³, Игорь Игоревич Николаев⁴**

^{1, 2, 3} Научно-исследовательский центр судостроения, Калининград, Россия

⁴ ООО "Наутик Рус", Санкт-Петербург, Россия

³ viktor.belousov@klgtu.ru

Аннотация. В статье рассматривается обоснованный выбор размерений рыболовного судна с большим коэффициентом полноты. Суда данного типа являются относительно новыми для Российской Федерации, поэтому в большинстве литературных источников информации по их проектированию недостаточно. Определение характеристик судна производилось путем решения классической задачи проектирования с использованием основных и второстепенных зависимостей. Для возможности составления уравнений проектирования было принято решение ввести дополнительную проектную стадию – аванпроект. Цель указанной стадии, или аванпроекта, – проработка архитектурно-конструктивного типа, разработка общего расположения и промысловой схемы судна, а также выполнение ряда проектных и проверочных расчетов для определения возможности или невозможности создания нового судна данного типа, удовлетворяющего всем современным требованиям Правил Российского морского регистра судоходства. Результатом внедрения стадии аванпроекта судна является прототип для составления системы уравнений, в которой были проанализированы массогабаритные характеристики корпуса судна, а также подготовлены и проведены модельные испытания для возможности оценки мореходных качеств судна и составления уравнения мощности. Решение системы уравнений проектирования позволяет определить основные размерения и другие характеристики судна для последующих оптимизационных преобразований при создании нового проекта. Для решения поставленной задачи был разработан математический аппарат, в который вошли уравнения проектирования, в том числе уравнения плавучести, масс, вместимости, коэффициента полноты ватерлинии, остойчивости, мощности, относительно удлинения, коэффициента продольной полноты, а также граничные условия и расчет экономических показателей будущего судна. Ключевым показателем экономической рентабельности проекта была определена эффективность капиталовложений. Для поиска наиболее эффективного судна выполнен вариативный расчет – решение системы уравнений с вариацией некоторых исходных данных. По результатам вариативного расчета определены наиболее удачные сочетания основных характеристик судна, обеспечивающих лучшие экономические показатели.

© Чуреев Е. А., Романюта Д. А., Белоусов В. А., Николаев И. И., 2022

Ключевые слова: научно-исследовательский центр судостроения, проектирование судов гражданского флота, разработка проекта, модельные испытания, проектирование судов рыболовного флота, Правила Российского морского регистра судоходства, аванпроект, коэффициент общей полноты, обводы судна, уравнения проектирования, мореходные качества, экономические показатели, эффективность капиталовложений, математическая модель, наливное рыболовное судно

Для цитирования: Чуреев Е. А., Романюта Д. А., Белоусов В. А., Николаев И. И. Обоснование и выбор основных характеристик малого рыболовного судна с большой полнотой корпуса // Известия КГТУ. 2022. № 67. С. 71–86. DOI: 10.46845/1997-3071-2022-67-71-86.

Original article

Justification and selection of the main characteristics of a small fishing vessel with a high body hull

Evgeniy A. Chureev¹, Dmitriy A. Romanyuta², Viktor A. Belousov³, Igor' I. Nikolaev⁴

^{1,2} Shipbuilding research center, Kaliningrad, Russia

⁴ Nautic Rus, Saint-Petersburg, Russia

³ viktor.belousov@klgtu.ru

Abstract. The article discusses a reasonable choice of dimensions of a fishing vessel with a large coefficient of completeness. Vessels of this type are relatively new for the Russian Federation, therefore, in most literary sources, there is not enough information on the design of these types of vessels. The characteristics of the ship are determined by solving the classical design problem, using the main and secondary dependencies. In order to be able to draw up design equations, it was decided to perform an additional design study – the stage of the preliminary design. The purpose of this work is to develop the architectural and structural type of the vessel, to develop the general layout and fishing scheme, as well as to perform a number of design and verification calculations to determine the possibility or impossibility of creating a new vessel of this type that meets all modern requirements of the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping. The result of the development of the preliminary design of the vessel is a prototype for compiling a system of equations in which the weight and size characteristics of the ship's hull developed at the stage of the preliminary design have been analyzed, as well as model tests have been prepared and carried out to assess the seaworthiness of the vessel and draw up the power equation. The solution of the system of design equations makes it possible to determine the main dimensions and other characteristics of the vessel for subsequent optimization transformations when designing a new project. In order to solve the problem, a mathematical apparatus has been developed with design equations, including the equations of buoyancy, mass, capacity, waterline completeness factor, stability, power, elongation, longitudinal completeness factor, as well as boundary conditions and calculation of economic indicators of the future ship. The key indicator of the economic profitability of the project is the efficiency of capital investments. To search for the most efficient vessel, a variant calculation has been per-

formed – the solution of a system of equations with a variation of some initial data. According to the results of the variant calculation, the most successful combinations of the main characteristics of the vessel, providing the best economic performance, have been determined.

Keywords: shipbuilding research center, design of civil fleet ships, project development, model tests, design of fishing ships, Russian Maritime Register of Shipping Rules, preliminary design, overall weight factor, ship's lines, design equations, seaworthiness, economic indicators, investment efficiency, mathematical model, tanker fishing vessel

For citation: Chureev E. A., Romanyuta D. A., Belousov V. A., Nikolaev I. I. Justification and selection of the main characteristics of a small fishing vessel with a high body hull. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2022; (67) : 71–86. (In Russ). DOI: 10.46845/1997-3071-2022-67-71-86.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс проектирования любого судна согласно классической схеме ведется методом последовательных приближений. ГОСТ 2.103-2013 "Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Стадии разработки" [1] регламентирует следующие стадии разработки проектной конструкторской документации: техническое предложение – эскизный проект – технический проект. Однако в процессе создания таких сложных технических объектов, как промысловое судно, имеет смысл ввести дополнительные стадии разработки, предназначенные для обоснования возможности создания объекта, особенно если используются новые технические решения.

Одним из таких объектов морской техники является малое рыболовное судно с большим значением коэффициента общей полноты. Как отмечалось в работах [2] и [3], данные суда являются более эффективными, чем существующие отечественные, с точки зрения промысла при схожих габаритных размерах.

Отсутствие в России опыта проектирования промысловых судов подобного типа поставило перед коллективом Научно-исследовательского центра судостроения цель начать работы по разработке математического аппарата, предназначенного для определения главных размерений малых морских наливных рыболовных судов с большой полнотой корпуса.

Основные принципы математического аппарата. В основе разрабатываемого математического аппарата лежит классическая задача проектирования промыслового судна, при решении которой можно получить основные характеристики судна: длину (L , м), ширину (B , м), высоту борта (H , м), осадку (T , м), водоизмещение (D , т), мощность главного двигателя (ГД) (N , кВт), скорость судна (v_s , уз), объем наливного трюма ($V_{тр}$, м³), а также коэффициенты полноты ватерлинии (α), мидель-шпангоута (β), общей полноты (δ) и продольной полноты (φ) корпуса судна.

Решение данной задачи основывается на составлении и решении системы уравнений проектирования, в числе которых уравнения:

- плавучести;
- масс;

- вместимости;
- коэффициента полноты ватерлинии;
- остойчивости;
- мощности;
- относительного удлинения;
- дополнительные уравнения.

На сегодняшний день в открытых источниках имеются несколько методик составления уравнений масс, вместимости, мощности в зависимости от главных размерений и основных характеристик судна. Наиболее часто используемые методики применительно к промысловым судам приведены в [4, 5].

Существует методика оптимизационного проектирования, представленная в [4], целью которой было проектирование судна, эксплуатируемого в акватории Социалистической Республики Вьетнам. Однако исследования, проведенные сотрудниками НИЦ судостроения, показывают, что используемые методики составления уравнения масс и другие, приведенные в открытых источниках, имеют недостаточную корреляцию применительно к малым и средним промысловым судам с увеличенной полнотой обводов. Такие расчетные алгоритмы неизбежно приведут к увеличению погрешности в полученных результатах.

Схожая ситуация и с уравнением мощности. В работе [3] приведена информация об отсутствии методик оценки буксировочного сопротивления и буксировочной мощности на ранних стадиях проектирования применительно к судам подобного типа (с увеличенным коэффициентом общей полноты корпуса). Использование доступного программного обеспечения для этих целей также ведет к заведомо некорректным результатам из-за появления в процессе движения судна гидродинамических сил, которые не учитываются в алгоритмах программы для ЭВМ.

При решении нетиповых задач проектирования промысловых судов с отсутствующими характеристиками с целью эффективной разработки проекта целесообразно ввести дополнительную стадию – аванпроект. С его помощью были решены следующие задачи: проработка архитектурно-конструктивного типа судна, анализ общего расположения и промысловой схемы, а также выполнение ряда проектных и проверочных расчетов для определения возможности или невозможности создания нового судна, удовлетворяющего всем современным требованиям Правил Российского морского регистра судоходства. Таким образом, результат проработки судна на стадии аванпроекта стал наиболее подходящим прототипом для возможности корректного составления и решения системы уравнений проектирования в конкретном случае. Форма корпуса разработанного судна на стадии аванпроекта представлена на рис. 1, а его основные характеристики – в табл. 1.

Любое добывающее судно в современном мире должно быть экономически рентабельным. Но решение системы уравнений проектирования позволяет определить только основные характеристики этого судна, что не дает возможности выполнить качественную оценку его экономической эффективности. Учитывая вышеуказанную проблему, авторы поставили своей целью выполнить вариативный расчет – решение ряда систем уравнений при фиксированных значениях нескольких неизвестных с последующей оценкой экономических показателей.

В проектировании промысловых судов как отрасли науки хорошую корреляционную зависимость показали вариативные расчеты с фиксацией таких параметров, как объем рыбного трюма и максимальная скорость свободного хода. Именно данные параметры в значительной мере влияют на главные размерения и основные характеристики промысловых судов, а также на их экономические показатели.

Для оценки экономической эффективности разрабатываемых проектов существует большое количество различных критериев, однако для решения поставленной задачи был выбран один – эффективность капиталовложения ($F_{\text{кап}}$).

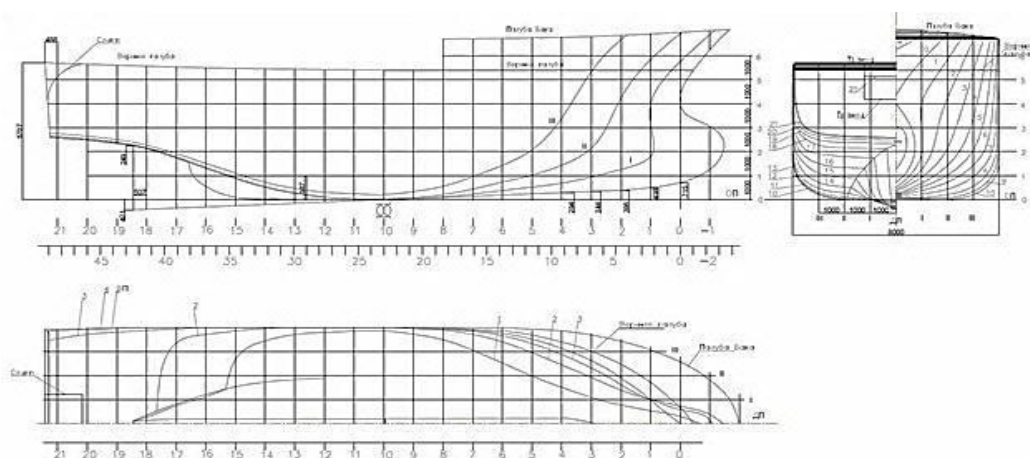


Рис. 1. Теоретический чертеж судна, разработанного на стадии аванпроекта
Fig. 1. Lines drawing of a ship at the preliminary design stage

Таблица 1. Основные характеристики судна, разработанного на стадии аванпроекта

Table 1. Main characteristics of the vessel developed at the preliminary design stage

Наименование	Единица измерения	Значение
Водоизмещение	т	405
Длина наибольшая	м	26,6
Длина между перпендикулярами	м	23,5
Ширина	м	8,00
Осадка	м	4,00
Высота борта на миделе	м	5,40
Объем трюма	м ³	110,9
Мощность главного двигателя	кВт	480
Скорость свободного хода	уз.	9,4
Мощность СЭС	кВт	260
Автономность	сут.	10
Экипаж	чел.	10

Уравнение масс. В математической модели оптимизации малого промыслового судна нагрузка масс определялась методом пересчета статей нагрузок с судна-прототипа с использованием измерителей и сопутствующих им функциональных зависимостей.

Как уже отмечалось, здесь и далее в качестве судна-прототипа было задействовано судно, разработанное на стадии аванпроекта. Стоит отметить, что в аванпроекте нагрузка масс рассчитывалась постатейно, т. е. отдельно считались составляющие массы корпуса судна (элементы металлического корпуса, оборудование, судовые системы, судовые устройства, дедвейт и т. д.). Такой метод позволяет повысить точность расчетов, однако приводит к увеличению вычислительной сложности.

Основное достоинство данного метода – это простота реализации, поскольку он представляет собой набор простых зависимостей, обеспечивающих хорошую точность благодаря подобию исследуемых в модели промысловых судов.

Однако использование судна-прототипа при создании данной математической модели ведет к погрешности при применении этой модели для судов, имеющих другой архитектурно-конструктивный тип. Стоит отметить, что предлагаемый метод требует большого количества исходных данных, входящих в математическую модель, которые необходимо снять с судна-прототипа.

Методика составления уравнения масс для модели малого промыслового судна принята в соответствии с [4] и выглядит следующим образом: в левой части уравнения – массовое водоизмещение судна, а в правой – сумма масс судна:

$$D \cdot (1 - k_1) = L \cdot B \cdot H \cdot k_2 + N_{ГД} \cdot k_3 + P_{indep} + a_{01} \cdot \delta^{\frac{1}{3}} \cdot L^{\frac{3}{2}} \cdot B \cdot H^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

Здесь коэффициент $(1 - k_1)$ учитывает запас плавучести, который принимается с судна прототипа;

a_{01} – измеритель массы стального корпуса судна, т/м³;

$N_{ГД}$ – мощность главного двигателя, кВт;

k_3 – коэффициент, включающий в себя измеритель массы двигателя, а также учитывающий массу необходимого топлива в зависимости от мощности судовой энергетической установки;

P_{indep} – сумма масс, т, которые не зависят от размещений судна (штурманское вооружение, постоянные жидкие грузы, запасные части, балласт, снабжение и имущество, дедвейт (без учета массы топлива)).

Большинство статей нагрузок судна используют функциональную зависимость в виде кубического модуля LBH , поэтому коэффициент k_2 – сумма измерителей статей нагрузок, полученных путем пересчета с прототипа (судовые устройства, судовые системы, электроэнергетическая система, связь и управление).

Уравнение вместимости. Методика составления уравнения вместимости для модели принята в соответствии с [5]. Для составления уравнения также, как и в уравнении масс, используется пересчет с судна-прототипа. Оно имеет следующий вид:

$$LBHT\delta\left(\frac{H}{T}\right)^{\frac{\alpha}{\delta}}w_1 = B\left(\eta_b TL\frac{\delta}{\beta} + Lw_p + w_{kof}\right) + N_{ГД}w_{fuel} + W_{ind} + w_{eng}BL. \quad (2)$$

В левой части уравнения вместимости – объем корпуса судна [6].

Здесь коэффициент w_1 представляет совокупность измерителей объемов, полученных с судна-прототипа;

w_{fuel} – измеритель, учитывающий объем необходимого топлива для нормальной эксплуатации судна, $\text{м}^3/\text{т}$;

W_{ind} – совокупность объемов, м^3 , которые не зависят от главных размеров судна (объем пресной воды и сточных вод, объем трюма и рефрижераторного помещения, объем цистерн нефтесодержащих вод, объем топливных цистерн для судовых генераторов, объем помещений под рыбопромысловое оборудование);

w_{eng} – измеритель объема машинного отделения, м ;

η_b – измеритель объема в бульбе судна;

w_{kof} – измеритель объема коффердама, м^2 ;

w_p – измеритель объема жилых помещений, м .

Уравнение коэффициента полноты ватерлинии. Уравнение коэффициента полноты ватерлинии составлено в соответствии с рекомендациями [6] и имеет следующий вид:

$$\alpha = c_{02} \left(\frac{\delta}{\beta} \right)^{2/3} \quad (3)$$

В данном уравнении коэффициент c_{02} пересчитывается с судна-прототипа по следующей формуле:

$$c_{02} = \alpha_0 \cdot \varphi_0^{\frac{2}{3}}. \quad (4)$$

Согласно рекомендациям коэффициент должен находиться в интервале 0,91–1,06.

Уравнение остойчивости. Уравнение остойчивости представлено как квадратное уравнение относительно отношения ширины к осадке B/T при известном отношении H/T (уравнение вместимости) и коэффициентах полноты δ и α (требования ходкости и эмпирические составляющие) [4].

$$\frac{B}{T} = \bar{h}^* + \sqrt{\bar{h}^{*2} - 4 \cdot k_p \cdot \frac{\alpha^2}{\delta} \cdot \left(k_c \cdot \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\delta}} - a_G \cdot \frac{H}{T} \right) / \left(2 \cdot k_p \cdot \frac{\alpha^2}{\delta} \right)}. \quad (5)$$

Здесь \bar{h}^* – предельная относительная поперечная метацентрическая высота $\bar{h}^* = h/B$;

коэффициент k_p определяется с судна-прототипа по формуле Б. А. Царева [6]:

$$k_p = \frac{\left(\frac{\alpha_0}{\varphi_0} \right)^{\frac{1}{3}}}{12}; \quad (6)$$

a_G – относительное возвышение центра тяжести, которое вычисляется с прототипа по формуле:

$$a_G = z_{g0}/H_0. \quad (7)$$

Коэффициент k_c принимается равным 0,994.

Уравнение мощности. Уравнение мощности является одним из основных и важных в данной системе уравнений проектирования. Его составление основывается на рекомендациях [5]. Для разработки такого уравнения необходимо получить зависимость изменения сопротивления движению судна от скорости хода и, соответственно, изменение мощности СЭУ от скорости хода. Поскольку форма корпуса у рассматриваемого типа судна специфическая – с большой полнотой, то

составление данного уравнения с использованием приближенных методик, как уже было сказано выше, является невозможным.

Для решения этой задачи в лаборатории мореходных качеств судов Научно-исследовательского центра судостроения были подготовлены и проведены модельные испытания корпуса судна, полученного в результате разработки аванпроекта, теоретический чертеж которого представлен на рис. 1. Испытания проводились для случая нагрузки "возвращение с промысла: 100 % улова, 10 % запасов". Указанный случай соответствует максимальному значению водоизмещения судна. Испытания были проведены на свободной воде в диапазоне скоростей, соответствующих скоростям натурного судна – 4–12 уз ($Fr = 0,12–0,41$). В результате получены зависимости коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда. Учет сопротивления трения происходил расчетным путем через коэффициент сопротивления эквивалентной пластины по формуле Прандтля – Шлихтинга. При этом площадь смоченной поверхности судна рассчитывалась по формуле

$$\Omega_s = kt \cdot \sqrt{L^2 \cdot B \cdot T \cdot \delta}, \quad (8)$$

где kt – уточняющий коэффициент, полученный по значениям судна-прототипа.

Также учитывалась поправка на шероховатость. Зависимость коэффициента остаточного сопротивления судна от числа Фруда представлена на рис. 2.

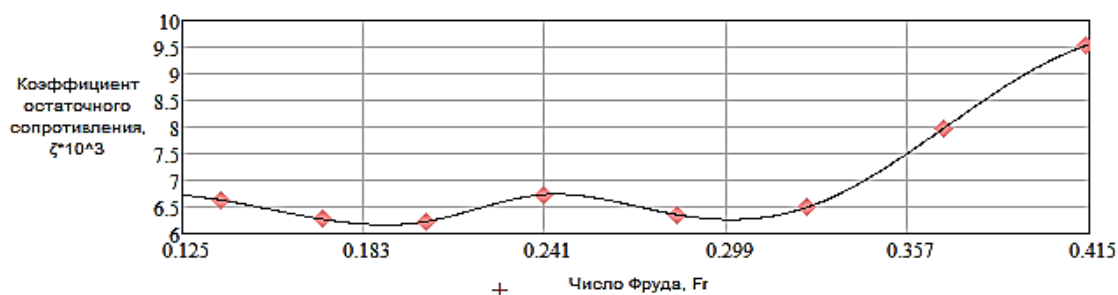


Рис. 2. Зависимость коэффициента остаточного сопротивления судна от числа Фруда

Fig. 2. Dependence of the ship's residual drag coefficient on the Froude number

Таким образом, для составления уравнения мощности на данном этапе принимаются следующие допущения:

- изменение коэффициента остаточного сопротивления для всех судов в настоящей математической модели происходит по аналогии с судном-прототипом по итогам модельных испытаний. Этот коэффициент определяется как функция от числа Фруда, $\zeta(Fr)$;
- коэффициент сопротивления трения рассчитывается по формуле Прандтля-Шлихтинга, $C_{f0}(Re)$ в зависимости от расчетной площади смоченной поверхности;
- поправка на шероховатость, s_Δ , принимается равной $0,2 \cdot 10^{-3}$;
- на заданной скорости двигатель должен работать на 85 % от номинальной мощности, что отражено в коэффициенте $\eta_{гд} = 0,85$;
- в расчете принят коэффициент $k = 1,3$, учитывающий влияние реальных эксплуатационных условий на работу судна;

• пропульсивный коэффициент принят, как у судна-прототипа, а именно $\eta_{pp} = 0,234$.

Отдельно необходимо отметить следующее: рабочий режим судна – траление, но поскольку необходимая мощность на свободном ходу сопоставима с мощностью, необходимой для траления, то используется следующий алгоритм: если расчетная мощность главного двигателя для движения судна на свободном ходу с заданной скоростью менее 480 кВт (значение мощности ГД судна по результатам проработки аванпроекта для обеспечения возможности буксировать трал с расчетной скоростью), то мощность ГД принимается равной 480 кВт. В случае когда расчетная мощность судна для движения на свободном ходу более 480 кВт, выбирается расчетная мощность. Данное допущение необходимо не только для корректного решения системы уравнений проектирования, но и для корректного расчета экономических критериев.

Уравнение для определения мощности судна представляется в виде:

$$N_{ГД} = \frac{\rho \cdot v^3}{2} \cdot \Omega_s \cdot [C_{f0}(Re) + \zeta(Fr) + c_{\Delta}] \cdot \frac{k}{\eta_{ГД} \cdot \eta_{pp}}, \quad (9)$$

где v – скорость судна в м/с.

Уравнение относительного удлинения. В качестве еще одного уравнения проектирования принимается уравнение относительного удлинения судна [5].

$$l = c \cdot \left(\frac{v_s}{v_s + 2} \right)^2. \quad (10)$$

Здесь v_s – скорость судна в узлах; коэффициент c , который связывает скорость и относительное удлинение, принимается по прототипу.

Дополнительные уравнения. В качестве дополнительных уравнений было принято уравнение коэффициента продольной полноты судна [5].

$$\varphi = \frac{0,653}{Fr^{0,059}} + 0,035, \quad (11)$$

где Fr – число Фруда.

Граничные условия. Для возможности корректного решения системы уравнений были заданы граничные условия значений коэффициентов полноты (представлены как совокупность ограничений (1) и минимальной мощности ГД (не менее 480 кВт)). Ограничение по минимальной мощности ГД обусловлено необходимостью "тащить" трал на промысле.

$$\begin{aligned} 0,8 &\leq \beta \leq 0,95, \\ 0,8 &\leq \alpha \leq 0,95, \\ 0,5 &\leq \delta \leq 1, \\ 0,5 &\leq \varphi \leq 1. \end{aligned} \quad (12)$$

Расчет критериев экономической эффективности. В результате вычислений, представленных в данном блоке, рассчитывается критерий, по которому выполняется оптимизация главных характеристик судна и оценивается его эффективность. В качестве основного оценочного критерия выбрана характеристика *эффективности капиталовложений*, определяемая по следующей формуле (13):

$$F_{\text{кап}} = \frac{Q_{\Gamma} - C_s}{S_k}, \quad (13)$$

где $F_{\text{кап}}$ – эффективность капиталовложений;

S_k – строительная стоимость судна;

C_s – годовые эксплуатационные затраты;

Q_r – производительность судна за год.

В экономической части разработанной математической модели производится расчет каждой из указанных величин.

Расчет строительной стоимости судна. Расчет строительной стоимости судна произведен исходя из предположения, что строительство будет выполнено на АО "ПСЗ Янтарь". По этой причине часть коэффициентов и нормативных показателей, используемых в модели, принята в соответствии с данными завода (стоимость нормо/часа, транспортные расходы, удельная трудоемкость некоторых видов работ и др.). Расчет строительной стоимости судна условно можно разделить на несколько составных частей.

1. Расчет стоимости проектирования судна. В данном подразделе сначала рассчитывается трудоемкость проектирования судна (с учетом роста производительности труда и использования прототипа), после чего определяется стоимость работ по проектированию. При расчете использовались нормативы, принятые в соответствии с [7].

2. Расчет трудоемкости строительства. Здесь выполняется расчет трудоемкости основных видов работ, таких как "обработка деталей стального корпуса", "предварительная сборка конструкций стального корпуса", "достроечные работы", "трубомонтажные работы" и т. д.

Исходными данными для расчетов являются:

- а) нагрузка масс судна порожнем, рассчитываемая в ходе решения системы уравнений проектирования;
- б) информация о нормативной трудоемкости для различных видов работ. Используемые значения нормативов и коэффициентов приняты в соответствии с [8].

По результатам расчета определяется трудоемкость изготовления головного и серийного судна (с использованием коэффициента серийности).

3. Расчет стоимости строительства судна. При расчете стоимости строительства принята методология оценки затрат по укрупненным показателям.

Исходные данные для расчетов:

- а) нагрузка масс судна порожнем;
- б) удельная стоимость каждой из статьи нагрузок, принятая в соответствии с данными судостроительных предприятий;
- в) стоимость таможенных расходов при приобретении импортного оборудования, принятая в соответствии с [9];
- г) стоимость услуг страхования и регистрации в классификационном обществе.

В результате рассчитывается строительная стоимость головного и серийного судна.

4. Расчет стоимости строительства судна с учетом кредита. Экономическая часть математической модели разработана с условием, что судно строится за определенную сумму собственных и большую часть заемных средств. При задании срока и процента кредитования определяется стоимость строительства судна с учетом выплачиваемых процентов за кредит.

Расчет эксплуатационных затрат. При расчете эксплуатационных затрат предполагается, что время эксплуатации судна с учетом его постройки и утилизации

составляет 27 лет. Определение всех статей эксплуатационных затрат выполнено с учетом их ежегодных распределений. Таким образом, имеется возможность оценить общую сумму эксплуатационных затрат в каждый год службы судна.

Расчет эксплуатационных затрат судна выполнен по следующим основным статьям:

1. *Расходы на ремонт и техническое обслуживание.* В указанную статью расходов включены затраты на ежегодное техническое обслуживание, промежуточное освидетельствование подводной части судна и его ремонт с подтверждением класса Регистра. Периодичность проведения мероприятий и их средние затраты определены по данным рыболовецких компаний Калининградской области.

2. *Условно-постоянные расходы.* К данной категории затрат относятся среднемесячная заработная плата экипажа, затраты на администрирование и страхование судна. Все нормативные показатели приняты по данным рыболовецких компаний Калининградской области и [10].

3. *Расходы на топливо.* В этой статье затрат произведен расчет расходов на топливо в процессе переходов и траления. При этом в расчете установлены следующие положения и допущения:

а) мощность главного двигателя определена по результатам решения системы уравнений проектирования;

б) величина удельного расхода топлива принята как среднее значение среди двигателей схожего диапазона мощности;

в) доля нахождения судна в порту и вне эксплуатации от общего времени работы судна в год определена по статистическим значениям;

г) цена за тонну судового топлива принята по статистическим данным [11].

4. *Расходы на замену оборудования.* В качестве регулярно заменяющегося оборудования приняты ваера, трал, кабеля и траловые доски. Периодичность обновления и стоимость комплектов определены по анализу данных рыболовецких компаний Калининградской области.

5. *Сбор за вылов рыбы.* В соответствии со ст. 333.4 [12] за каждый объект водных биологических ресурсов устанавливается определенная ставка сбора из расчета на 1 т продукции. Виды и объемы вылавливаемой рыбы описаны в части расчета производительности судна.

Расчет производительности судна. В данном расчете модели представлен расчет ежегодной производительности судна от вылова рыбы и определение количества выручки от сдачи судна на металл в конце срока его эксплуатации.

Для расчета *дохода от вылова рыбы* используются следующие исходные данные:

а) среднесуточный вылов рыбы. Принимается как среднее значение для судов схожих размерений по данным рыболовецких компаний Калининградской области;

б) время, затрачиваемое судном на вылов. Определяется с учетом потери времени на стоянку в порту, неэксплуатационного времени и пр.;

в) процентное соотношение сортов рыбы в годовом улове и их рыночная цена.

Информация от рыболовецких компаний Калининградской области кратко представлена в табл. 2. Для расчета *дохода от сдачи судна на металл* в конце

срока его эксплуатации используются данные по массам статьи нагрузки "Корпус" и средней стоимости килограмма стали в пунктах приема металлолома.

Таблица 2. Процентное соотношение сортов рыбы в годовом улове и принятые цены

Table 2. Percentage of fish varieties in the annual catch and accepted prices

Род/сорт рыбы	Процент от годового улова	Цена, руб./кг без НДС
Килька для пром. переработки	9,8	20
Килька 2-го сорта	14,7	24
Килька 1-го сорта	24,5	30
Килька летняя (на корм)	21,0	11,5
Салака	17,5	32,5
Салака летняя (на корм)	7,5	11,5
Треска	3,0	30
Камбала	2,0	60
Всего	100	219,5

Результаты расчета. Как было описано ранее, разработанный сотрудниками НИЦ судостроения математический аппарат при использовании метода вариаций позволяет разрешать ряд уравнений проектирования и выявлять наилучшее сочетание основных характеристик судна. В качестве примера в табл. 3 представлены результаты решения уравнений при варьируемых значениях объема трюма и скорости судна. Строки № 1 и 2 в ней являются изменяемыми.

Таблица 3. Результаты решения математической модели

Table 3. Results of solving the mathematical model

№ п/п	Наименование характеристики, размерность	Буквенное обозначение	Значение		
1	Объем трюма, м ³	$V_{тр}$	80		
2	Скорость судна, уз	v_s	7	9	11
3	Длина, м	L	17,37	19,64	27,76
4	Ширина, м	B	7,44	7,26	7,31
5	Высота борта, м	T	2,92	2,85	2,87
6	Осадка, м	H	5,17	5,03	5,07
7	Коэффициент общей полноты	δ	0,592	0,585	0,58
8	Коэффициент полноты ватерлинии	α	0,867	0,861	0,856
9	Коэффициент полноты мидель-шпангоута	β	0,8	0,8	0,8
10	Коэффициент продольной полноты	ϕ	0,74	0,732	0,726
11	Мощность главного двигателя, кВт	$N_{гд}$	480	480	853
12	Строительная стоимость судна, млн. руб.	$Sk_{сумм}$	264,2	269,9	287,3
13	Производительность судна за год, млн. руб.	$Q_{выр/год}$	92,8	119,3	135,8
14	Эксплуатационные затраты в год, млн. руб.	$Cs/год$	27	36,9	64,7
15	Эффективность капиталовложений	$F_{кар}$	0,249	0,306	0,248

Вместе с тем при варьировании объема трюма и скорости хода судна определяется массив данных, на основании которого целесообразно получить соответствующие графические зависимости главного экономического критерия – эффективности капиталовложений в зависимости от скорости хода судна при различных фиксированных значениях объема трюма. Данный график приведен на рис. 3.

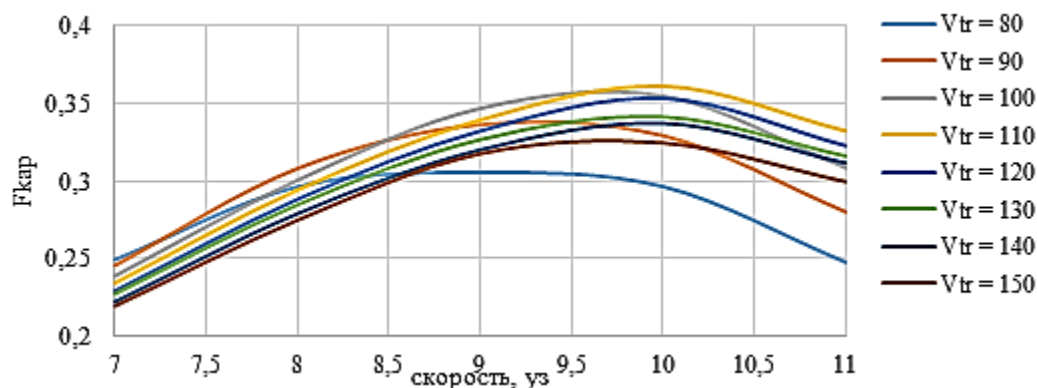


Рис. 3. График зависимости эффективности капиталовложений от скорости судна
Fig. 3. Graph of investment efficiency versus vessel speed

Как видно из графика, наиболее эффективным является судно с объемом трюма 110 м³ и скоростью хода 10 уз. В табл. 4 представлены характеристики наилучшего варианта оптимизированного судна.

Таблица 4. Характеристики наилучшего оптимизированного судна в заданных условиях эксплуатации

Table 4. Characteristics of the best-optimized ship under given operating conditions

№ п/п	Наименование характеристики, размерность	Буквенное обозначение	Значение
1	Объем трюма, м³	$V_{тр}$	110
2	Скорость судна, узлы	v_s	10
3	Длина, м	L	22,2
4	Ширина, м	B	7,8
5	Высота борта, м	T	4,88
6	Осадка, м	H	2,64
7	Коэффициент общей полноты	δ	0,673
8	Коэффициент полноты ватерлинии	α	0,859
9	Коэффициент полноты мидель-шпангоута	β	0,922
10	Коэффициент продольной полноты	φ	0,73
11	Мощность главного двигателя, кВт	$N_{гд}$	601
12	Строительная стоимость судна, млн. руб.	$Sk_{сумм}$	287,2
13	Производительность судна за год, млн. руб.	$Q_{выр/год}$	149,4
14	Эксплуатационные затраты в год, млн. руб.	$Cs/год$	45,7
15	Эффективность капиталовложений	F_{kap}	0,361

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам выполнения ряда расчетов в созданной математической модели удалось обеспечить решение системы уравнений проектирования, получив при этом главные размерения судна, а также оценить его экономическую эффективность на протяжении всего жизненного цикла в определенных условиях эксплуатации. Таким образом, используя данную модель, проектант имеет возможность выявлять наиболее удачные сочетания основных характеристик рыболовных судов для условий, определяемых техническим заданием на проектирование.

Преимущества разработанного математического аппарата:

1. Простота рабочего интерфейса;
2. Открытый код;
3. Наглядность всех используемых зависимостей и формул, отсюда следует, что пользователь может наблюдать эволюцию работы расчетной модели, а также иметь представление о достоверности входных и выходных данных;
4. Получение объемной по содержанию информации об итогах выполненных расчетов. Таким образом, пользователь имеет возможность принимать соответствующие решения о будущем проекте судна;
5. Возможность корректировки математической модели в зависимости от задач, поставленных перед проектантом.

Список источников

1. ГОСТ 2.103-2013 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Стадии разработки. Введ. 2015-07-01. М., 2018. 10 с.
2. Чуреев Е. А. К вопросу о выборе архитектурно-конструктивного типа малого рыболовного траулера для Балтийского моря // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3(37). С. 35–38.
3. Чуреев Е. А. Исследование формы обводов маломерного рыболовного траулера с целью повышения его мореходных качеств // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4 (42). С. 36–43.
4. Бугаев В. Г., Дам Ван Тунг, Бондаренко Ю. В. Оптимизация характеристик и элементов рыболовных судов с учетом случайных факторов их функционирования // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2021. № 1. С. 46.
5. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: в 2 т. Анализ и синтез системы "Корабль". Санкт-Петербург: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. Т. 2. 872 с.
6. Раков А. И., Севастьянов Н. Б. Проектирование промысловых судов: учебник. Ленинград: Судостроение, 1981. 376 с.
7. Нормативы трудоемкости и продолжительности проектирования гражданских судов № 299024-Н-91. ЦНИИ "РУМБ". Судостроение. 1991. 46 с.
8. Трудоемкость постройки судов. Нормативы. ФГУП "ЦНИИТС". РД5.ГКЛИ.0502-184-94. Введ. с 01.05.2010. Санкт-Петербург. 2011. 80 с.
9. Основные направления таможенно-тарифной политики на 2021 год и плановый период 2022 и 2023 годов (утв. Минфином России). Введ. с 10.01.2021. Москва, 2021. 75 с.

10. Техничко-экономическое обоснование. ФГУП "Крыловский государственный научный центр". "ИМЯН. Балтика. 360049.006". Санкт-Петербург. 2016.
11. Судовое топливо. URL: <http://toplivo777.ru/sudovoe-toplivo> (дата обращения: 15.03.2022).
12. Налоговый кодекс Российской Федерации (часть вторая) от 05.08.2000 № 117-ФЗ (ред. от 17.02.2021). URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 15.03.2022).

References

1. State Standard 2.103-2013. Unified system for design documentation (ESKD). Development stages. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 10 p. (In Russian).
2. Chureev E. A. K voprosu o vybere arkhitekturno-konstruktivnogo tipa malogo rybolovnogo traulera dlya Baltiyskogo morya [On choosing the architectural and structural type of a small fishing trawler for the Baltic Sea]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2017, no. 3(37), pp. 35–38.
3. Chureev E. A. Issledovanie formy obvodov malomernogo rybolovnogo traulera s tsel'yu povysheniya ego morekhodnykh kachestv [Investigation of the shape of the contours of a small fishing trawler in order to improve its seaworthiness]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2018, no. 4(42), pp. 36–43.
4. Bugaev V. G., Dam Van Tung, Bondarenko Yu. V. Optimizatsiya kharakteristik i elementov rybolovnykh sudov s uchetom sluchaynykh faktorov ikh funktsionirovaniya [Optimization of the characteristics and elements of fishing vessels, taking into account random factors of their functioning]. *Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU*, 2021, no. 1, pp. 46.
5. Teoriya proektirovaniya vodoizmeshchayushchikh korabley i sudov [Theory of designing displacement ships and vessels]. Saint-Petersburg, NITS MORINTEKH Publ., 2014, vol. 2, 872 p.
6. Rakov A. I. Sevast'yanov N. B. *Proektirovanie promyslovykh sudov: ucheb-nik* [Designing fishing vessels: students' book]. L., Sudostroenie Publ., 1981, 376 p.
7. Normativy trudoemkosti i prodolzhitel'nosti proektirovaniya grazhdanskikh sudov № 299024-H-91. TSNI "RUMB". Sudostroenie Publ., 1991, 46 p.
8. Trudoemkost' postroyki sudov. Normativy. FGUP "TSNIITS" RD5.GKLI.0502-184-94. Saint-Petersburg, 2011, 80 p.
9. Osnovnye napravleniya tamozhenno-tarifnoy politiki na 2021 god i planovyy period 2022 i 2023 godov. Minfin Rossii. Moscow, 2021, 75 p.
10. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie. FGUP Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr. IMYAN. Baltika. 360049.006. Saint-Petersburg, 2016.
11. Sudovoe toplivo. Available at: <http://toplivo777.ru/sudovoe-toplivo> (Accessed 15 March 2022).
12. Nalogovyy kodeks Rossiyskoy Federatsii (chast' vtoraya). Publ. 05 August 2000. No 117-FZ, available at: <http://www.consultant.ru/> (Accessed 17 March 2022).

Информация об авторах

Е. А. Чуреев – заместитель директора научно-исследовательского центра судостроения по науке; e-mail: e.chureev@klgtu.ru

Д. А. Романюта – ведущий инженер отраслевой лаборатории эксплуатационной прочности промысловых судов, аспирант кафедры кораблестроения; e-mail: dmitrij.romanyuta@klgtu.ru

В. А. Белоусов – инженер-конструктор, магистрант кафедры кораблестроения

И. И. Николаев – инженер-конструктор; e-mail: Nikolayev@nautic-rus.ru

Information about the authors

E. A. Chureev – deputy director of the Research Center for Shipbuilding in Science; e-mail: e.chureev@klgtu.ru

D. A. Romanyuta – leading engineer of the Branch Laboratory of the Operational Strength of Fishing Vessels, post-graduate student; e-mail: dmitrij.romanyuta@klgtu.ru

V. A. Belousov – design engineer, master degree student at the Department of shipbuilding

I. I. Nikolaev – design engineer; e-mail: nikolaev@nautic-rus.ru

Статья поступила в редакцию 01.09.2022; одобрена после рецензирования 06.09.2022; принята к публикации 21.10.2022.

The article was submitted 01.09.2022; approved after reviewing 06.09.2022; accepted for publication 21.10.2022.