

Научная статья

УДК 629.12

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-3/39-54>

Оптимизация характеристик судов с учётом вероятностной природы исходных данных в моделях проектирования

Максим Владимирович Китаев✉, Виктор Григорьевич Бугаев,
Игорь Александрович Новосельцев, Наталья Романовна Лиходедова,
Станислав Евгеньевич Черняхович

Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация

✉ kitaev.mv@dvfu.ru

Аннотация. В статье представлены основные положения методики оптимизации проектных характеристик судов с учётом вероятностной природы исходных данных. Рассмотрены этапы эволюции расчётных методов и роль информационных технологий в теории проектирования судов. Отмечены причины возникновения и необходимость учёта неопределённости при проектировании судов. Рассмотрен алгоритм учёта вероятностной природы исходных данных в моделях проектирования и способы формирования критериев. Представлены результаты сравнительных расчётов в детерминированной и вероятностной постановке.

Ключевые слова: проектирование судов, случайные факторы, оптимизация характеристик, экономическая эффективность

Для цитирования: Китаев М.В., Бугаев В.Г., Новосельцев И.А., Лиходедова Н.Р., Черняхович С.Е. Оптимизация характеристик судов с учётом вероятностной природы исходных данных в моделях проектирования // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 3(64). С. 39–54.

Original article

Optimization of ships characteristics with taking into account the probabilistic nature of the initial data in design models

Maksim V. Kitaev✉, Viktor G. Bugaev, Igor A. Novoseltcev, Natalya R. Likhodedova,
Stanislav E. Chernyakhovich

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

✉ kitaev.mv@dvfu.ru

Abstract. The article presents the key features of ships design methodology with taking account the random factors and probabilistic nature of the initial data. The stages of the evolution of computational methods and the role of information technology in the theory of ship design are considered. The reasons of appearance and necessity to accounting the uncertainty in ship design process are noted. An algorithm for taking into account the probabilistic nature of the initial data in ship design models and methods of criteria construction are considered. The results of comparative calculations in a deterministic and probabilistic statements are presented.

Keywords: ship design, random factors, characteristics optimization, economic efficiency

For citation: Kitaev M.V., Bugaev V.G., Novoseltcev I.A., Likhodedova N.R., Chernyakhovich S.E. Optimization of ships characteristics with taking into account the probabilistic nature of the initial data in design models. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 3(64), pp. 39–54. (In Russ.).

Введение

Проектирование нового судна представляет собой сложную и многоуровневую задачу, решение которой невозможно без тесного сотрудничества между судовладельцем (заказчиком), представителями проектно-конструкторского бюро и верфи. Основная цель проектирования состоит в разработке проекта и сдаче заказчику судна, соответствующего его ожиданиям с точки зрения экономической эффективности, удовлетворяющего требованиям к мореходным качествам, прочности, вместимости, комфорту, безопасности и экологичности.

В период плановой экономики в качестве заказчиков выступали министерства и ведомства, которые усилиями подведомственных им научно-исследовательских институтов и проектных организаций разрабатывали технические задания на проектирование судов с учётом отечественного и зарубежного опыта, мировых тенденций, касающихся развития конкретного типа судов, сопоставляя их с проектными характеристиками существующих аналогов. Такое внимание к процессу проектирования было обусловлено необходимостью постройки судов большими сериями (десятками, а иногда и сотнями единиц).

После распада СССР и перехода к рыночной экономике, частной собственности большая часть таких институтов была ликвидирована, да и суда частные инвесторы заказывают и строят гораздо меньшими сериями. Проблема состоит в том, что в современных условиях новое судно не всегда является эффективным (как с экономической, так и с функциональной точки зрения). Это связано с попытками судовладельцев сэкономить на предпроектных исследованиях, приобретая суда на вторичном рынке или принимая за основу проекты ранее построенных судов (часто 70–80 х годов прошлого столетия) без должного анализа соответствия их проектных характеристик реальным условиям эксплуатации.

Проектирование – это многоэтапный, итеративный процесс принятия решений с учётом определённых аспектов и компромиссов, определяющих архитектурные и конструктивные особенности будущего судна. В классических трудах по теории проектирования корабля этот процесс изображают в виде сходящейся спирали, впервые предложенной профессором Массачусетского технологического института Дж. Харви Эвансом (J. Harvey Evans) в 1959 году в работе [1] (рис. 1) и ретранслированной в последующем в трудах отечественных и зарубежных исследователей [2, 3].

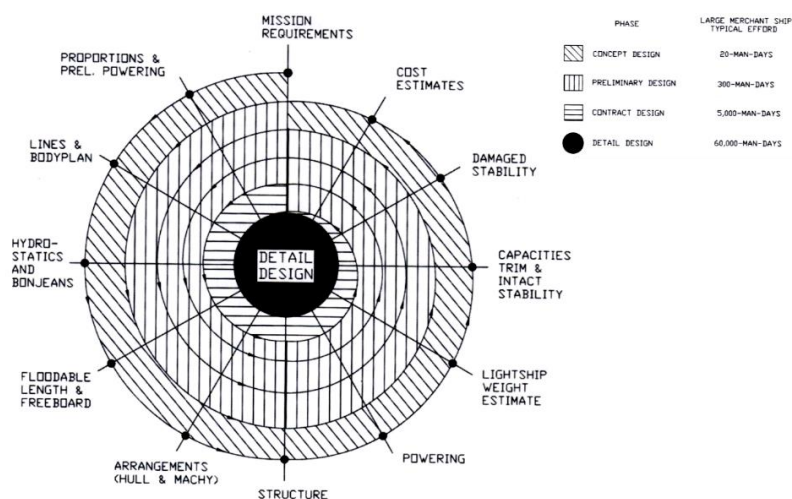


Рис. 1. Спираль проектирования судна

Fig.1. Ship design spiral

Из рис. 1 видно, что на концептуальное проектирование тратится менее 5% от общего бюджета времени, затрачиваемого на разработку проекта судна, однако до 90% возможностей и инновационного потенциала будущего судна приходится именно на этот этап. Это показывает важность ранних этапов, на которых происходит разработка альтернативных вариантов и анализ пространства проектных решений.

Согласно вышеприведённой спирали, на каждой итерации происходит уточнение проектных решений как по самому судну, так и по его отдельным подсистемам. В процессе проектирования приходится идти на ряд компромиссов, касающихся как архитектурно-конструктивных и компоновочных решений, так отдельных свойств и качеств судна, влияющих на его мореходность и функциональную эффективность.

С переходом на рыночные отношения и внедрением информационных технологий стал изменяться подход к проектированию и постройке судов как в техническом, так и методологическом плане. Опыт зарубежных стран – лидеров в области судостроения (Китай, Южная Корея, Япония), давно работающих в условиях жёсткой конкуренции, в качестве ключевых выделяет именно этапы начального проектирования: предпроектные исследования и концептуальное проектирование, после которых заключается судостроительный контракт и разрабатывается вся необходимая для постройки судна документация, а именно технический проект в рамках оговорённого судостроительным контрактом объёма, и проектная документация для судна в постройке (ПДСП) [4]. При этом разработкой ПДСП может заниматься как само конструкторское бюро, так и субподрядная организация или соответствующие подразделения судостроительной верфи.

Более того, зарубежные проектанты всё больше ориентируются на использование стандартных (типовых) проектов с заранее определённой архитектурой, компоновочными решениями и проектными характеристиками, конструкцией, судовыми системами и механизмами, что положительно сказывается на стоимости, качестве и сроках постройки, эксплуатационных и функциональных характеристиках. Это хорошо согласуется с концепцией, согласно которой цель проектирования судна состоит в поиске лучших решений, которые в то же время не являются слишком дорогостоящими.

Начиная с 1997 года в теории проектирования судов начинает развиваться новый блочно-иерархический подход к проектированию (DBB approach – от англ. Design Building Block), основу которого составляет архитектурно-ориентированный подход (реализуемый современными САД-системами), интегрированный с системами инженерного анализа (CAE-системами) и математическими моделями проектирования судов, что повышает наглядность моделирования и скорость анализа проектных решений на начальных этапах проектирования [5]. Этот подход представляет новое направление в развитии методологического аппарата теории проектирования судов, а в некоторых научных публикациях ставится в противовес традиционной спирали проектирования [5, 6].

В нашей стране многие предприятия по-прежнему работают только по факту представления детализированного технического проекта, необходимого верфи для оценки стоимости будущего судна. С началом строительства проект изменяется и уточняется с учётом сроков и возможностей поставки комплектующих и оборудования. Такой подход приводит к увеличению сроков и стоимости проектирования, т.к. технический проект постоянно претерпевает изменения, и чем глубже детализация, тем больше изменений в него вносится. Очевидно, что на ранних стадиях детализация не даёт очевидных преимуществ отечественным судостроительным предприятиям и усложняет взаимодействие всех участников процесса.

В условиях отсутствия профильных подведомственных научно-исследовательских институтов и проектных организаций, заказе и постройке судов малыми сериями, желании судоходных компаний и частных судовладельцев экономить на предпроектных исследованиях, разработка методов и моделей, способствующих принятию решений, основанных на оценке функциональной и экономической эффективности судов в реальных условиях эксплуатации, является актуальной задачей, имеющей прикладное значение.

Математические и имитационные модели широко используются в научных фундаментальных и прикладных исследованиях. На начальных этапах проектирования модели ускоряют процесс проработки концепции будущего судна, расширяют область допустимых решений и увеличивают число потенциальных альтернатив, позволяют сравнить их между собой, оценить устойчивость полученных решений при изменении условий эксплуатации и определить оптимально-компромиссные варианты, удовлетворяющие требованиям заказчика [7, 8].

Такой подход на последующих этапах разработки проекта судна позволяет сосредоточиться исключительно на элементах и параметрах судовых подсистем и корпусных конструкциях с целью удовлетворения требований, предъявляемых классификационным обществом к его мореходным качествам и показателям функциональной эффективности. Схематично процесс проектирования с использованием методов математического моделирования представлен на рис. 2.

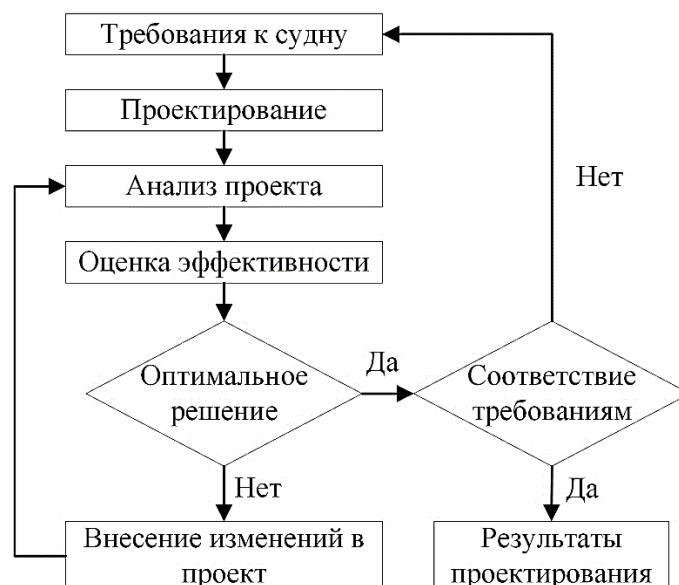


Рис. 2. Процесс проектирования судна

Fig. 2. Ship design process

В классической постановке задачи подразумевается, что в основе процесса проектирования лежат надёжные, достоверные и непротиворечивые данные (детерминированные), характеризующие условия постройки и эксплуатации будущего судна [1–3]. Это подразумевает однозначное, повторяемое и вполне предсказуемое поведение моделируемого объекта в заданных условиях (т.е. при одних и тех же исходных данных всегда получается один и тот же результат). Это связано с тем, что классическая теория в попытке упростить задачу проектирования судна и избавиться от неопределённости сужает границы пространства проектных решений и упрощает методы решения таких задач.

С экономической точки зрения судовладельцы рассматривают постройку нового судна как долгосрочный инвестиционный проект, направленный на получение прибыли посредством предоставления услуг по доставке грузов и пассажиров, т.е. удовлетворение потребностей на рынке морских перевозок. Особенностью проектов в области судостроения является то, что они достаточно ёмкие с финансовой точки зрения и требуют значительных вложений в начальный период, а также довольно продолжительные по времени (постройка судна занимает от 2 до 5 лет, а нормативный срок службы составляет 25 лет). Очевидным является тот факт, что реальные условия эксплуатации изменяются с течением времени и отличаются от расчётных. При проектировании судов всегда присутствуют факторы, вносящие неопределённость в расчёты, т.е. невозможно с абсолютной точностью определить, насколько принятые условия и полученные решения (оптимальные значения проектных характеристик) соответствуют действительности, если условия эксплуатации точно неизвестны [9–11]. Классический подход не даёт ответа на вопрос, насколько надёжным и устойчивым будет принятое решение в изменившихся условиях эксплуатации, а последствия принимаемых решений могут выходить далеко за рамки проектных характеристик и эксплуатационных показателей конкретно взятого судна, которое с позиций системного подхода является элементом системы более высокого уровня, а именно группы совместно работающих судов или флота [8].

Проектирование судов без учёта неопределённости и вероятностной природы исходных данных является скорее частным случаем, связанным с попыткой упрощения исходной задачи, чем общепринятым подходом, гарантирующим получение желаемого результата. Неопределённость в проектировании судов подразумевает наличие факторов, при воздействии на систему (судно, совокупность судов или флот в целом) которых результаты вычислений не являются детерминированными, а степень влияния на результаты неизвестна.

На практике различают два вида неопределённости: стохастическую (вероятностную), когда внешние факторы (случайные величины) статистически устойчивы, т.е. известны или определены законы распределения и их параметры, и нестохастическую, при которой нет стохастической устойчивости внешних факторов, они не могут быть описаны каким-либо законом распределения вероятностей ввиду недостаточности или полного отсутствия информации о рассматриваемом явлении или процессе; неопределённость промежуточного типа, когда внешние факторы учитываются на основе гипотез о законах распределения случайных величин.

В экономических расчётах и инженерной деятельности чаще рассматривают первый вид неопределённости – стохастическую, или вероятностную, что позволяет использовать известные законы распределения случайных величин, аппарат имитационного моделирования и методы стохастической оптимизации для поиска оптимальных решений [12, 13].

Случайные факторы по отношению к судну или рассматриваемой системе могут быть как внешними, так и внутренними и относиться к одной из трёх основных групп [11]:

1. Технические – влияют на надёжность и работоспособность судна и его подсистем на протяжении всего жизненного цикла (внутренние факторы).

2. Эксплуатационные – влияют на функциональную эффективность при выполнении задач, для решения которых спроектировано судно (внешние факторы).

3. Экономические – влияют на эксплуатационно-экономические показатели в течение всего жизненного цикла судна, уменьшая или повышая отдачу от первоначальных инвестиций (внешние факторы).

Анализ литературных источников показывает, что в моделях проектирования судов неопределённость (учитываемая посредством случайных факторов – законов распределения случайных величин) в расчётах может учитываться посредством значений [9, 11, 13–15]:

- исходных данных;
- параметров математических моделей;
- целей (критериев).

Неопределённость исходных данных обусловлена невозможностью точно предсказать в конкретный момент времени (или период эксплуатации будущего судна) значения показателей, характеризующих условия эксплуатации и состояния внешней среды (стоимость топлива, фрахтовые ставки, грузооборот, ветроволновые воздействия, время простоев по гидрометеорологическим условиям и др.).

Неопределённость параметров математических моделей определяется отсутствием или недостатком информации, относящейся к аналитическим зависимостям или значениям коэффициентов, используемых для описания физических процессов и явлений, определения показателей, характеризующих те или иные свойства и качества судна.

Неопределённость критериев обусловлена неоднозначностью выбора показателя для оценки эффективности работы судна в вероятностных условиях.

Независимо от того, каким образом неопределённость передаётся и учитывается в моделях проектирования судов, сам факт (попытка) её учета подразумевает изменение значений оптимизируемых переменных и показателей функциональной эффективности (критериев) в процессе повторяющихся вычислений. Это приводит к сложности выбора варианта судна, удовлетворяющего различным (изменяющимся во времени) условиям эксплуатации и являющегося наилучшим с точки зрения принятого показателя эффективности. Таким образом, неопределённость возникает из-за неполноты или неточности исходных данных, связана с принятием решений и является причиной появления рисков в случае реализации проекта судна и отклонении фактических значений показателей функциональной эффективности от расчётных.

Риск, в свою очередь, характеризуется вероятностью наступления каждого из возможных исходов (неблагоприятного либо благоприятного) в зависимости от выбранного показателя эффективности. Это говорит о том, что классические показатели сравнительной экономической эффективности, используемые при проектировании [1–3, 7, 8], не подходят для принятия решений в случае вероятностной природы исходных данных. Для решения таких задач необходимо использовать вероятностные критерии, которые должны не только позволять выбирать определённый (наилучший) вариант судна из множества возможных, но и в той или иной степени учитывать устойчивость и чувствительность полученного решения к изменению значений показателей, характеризующих внешнюю среду.

Несмотря на очевидные преимущества, применение вероятностных методов и моделей в практике проектирования судов не получило широкого распространения ввиду трудоёмкости их создания и сложности интерпретации результатов. Вследствие этого для снижения неопределённости судовладельцы предпочитают использовать проверенные временем решения, заказывать и строить типовые отечественные или зарубежные проекты судов, доработанные с учётом достижений в науке, технике и отвечающие современным требованиям к безопасности, экологичности и комфорту. В результате новое судно не сильно отличается от прототипа и в какой-то мере не является современным, а такой подход не приводит к снижению неопределённости, т.к. судно может устареть с экономической точки зрения задолго до наступления физического или морального износа. Судно должно поддерживать приемлемый уровень эксплуатационных характеристик на протяжении всего срока службы, несмотря на то что его технические возможности со временем снижаются. Этот говорит о том, что проектант должен не только уметь рассчитывать проектные характеристики и главные размерения будущего судна, но и делать прогноз (основанный на прошлом опыте и анализе текущей ситуации) на несколько лет вперёд с целью оценки влияния конкуренции и изменения условий эксплуатации на его функциональную эффективность.

Ввиду сложности и несовершенства методологического аппарата принятия решений в условиях неопределённости в настоящее время не существует единого подхода к решению таких задач. Тем не менее учёными разработаны методы формализации задач принятия решений в условиях неопределённости, которые носят рекомендательный характер. Выбор окончательного варианта остаётся за лицом, принимающим решение (в нашем случае судовладельцем/заказчиком) [16].

На практике используют подход, при котором случайные величины, из числа исходных данных, заменяются их средними значениями, тогда вероятностная задача преобразуется и решается в детерминированной постановке [7]. Однако и в этом случае существует вероятность получения результата, который будет хуже ожидаемого (полученного для среднего) значения. Более того, применительно к пассажирским судам такой подход не позволяет в полной мере учитывать особенности распределения пассажиропотока во времени, что может привести не только к существенному снижению функциональной эффективности судна и созданию социальной напряжённости в отдельные периоды времени.

Другой способ упрощения исходной задачи связан с нахождением совокупности оптимальных проектных решений для нескольких вариантов развития событий. В этом случае результаты вычислений (проектные характеристики и эксплуатационно-экономические показатели) будут отличаться друг от друга при разных сочетаниях исходных данных. В случае выбора одного варианта (из множества оптимальных) существует вероятность получить результат хуже ожидаемого (прогнозируемого значения выбранного критерия).

Попытки решить задачу проектирования судна в условиях неопределённости привели к созданию комбинированных оптимизационно-имитационных моделей, которые объединяют методы теории проектирования судов, оптимизации и имитационного моделирования [13, 15]. Такие модели позволяют имитировать последовательность операций, характерных для исследуемого объекта, определять эксплуатационно-экономические показатели в различных условиях эксплуатации и находить сочетание проектных характеристик, наилучшим образом удовлетворяющих целевым показателям и условиям рассматриваемой задачи.

Учёт неопределённости и стохастической природы исходных данных в моделях проектирования судов позволяет создавать не просто новые (похожие на суда-прототипы), а современные суда и морские транспортные системы, устойчивые к кризисным ситуациям, способные адаптироваться к изменениям внешней среды и имеющие конкурентные преимущества в части расходования имеющихся ресурсов и достижения поставленных целей.

В настоящей статье на примере пассажирского судна катамаранного типа, применительно к условиям осуществления морских пассажирских перевозок в заливе Петра Великого между Владивостоком и островами Попова и Рейнеке, рассматривается методологический подход к учёту вероятностной природы исходных данных в моделях проектирования судов.

Модельные представления

В теории проектировании судов моделирование используют для лучшего понимания взаимосвязей оптимизируемых переменных (проектных характеристик) и критериев от исходных данных и параметров, характеризующих условия эксплуатации [2, 7, 8].

Развитие вычислительной техники и информационных технологий вывело моделирование в судостроении на новый уровень. В последние годы во всех его проявлениях (математическое, имитационное и трёхмерное) моделирование пытаются использовать как основу для создания систем поддержки принятия управленческих решений и количественной оценки последствий неопределённостей [14, 17, 18]. Такие системы (например, ABD – Accelerated Business Development от компании Ulstein) не только осуществляют сбор информации для проведения углублённого анализа, но и позволяют исследовать потенциальные факторы, влияющие на результаты технико-экономического обоснования, сформировать архитектурно-конструктивные особенности, подобрать типовые конструктивные решения и спецификацию будущего судна [17]. Таким образом, сложно переоценить роль методов математического моделирования в судостроении.

Для разработки методики оптимизации проектных характеристик с учётом вероятностной природы исходных данных необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать модель проектирования (определения проектных характеристик и элементов судна).
2. Разработать имитационную модель функционирования судна.
3. Разработать методы учёта вероятностной природы исходных данных.
4. Выполнить количественную оценку эксплуатационных показателей судна.
5. Сформировать вероятностные критерии оценки.
6. Выполнить анализ устойчивости полученного решения.
7. Разработать рекомендации по выбору оптимального варианта.

Первые две задачи были решены и представлены нами ранее в работах [19, 20], в которых подробно описаны модели проектирования и имитации работы пассажирского судна. Поэтому в настоящей статье сконцентрируемся на рассмотрении задач 3–7.

В графическом виде алгоритм учёта вероятностной природы исходных данных в моделях проектирования судов представлен на рис. 3.

Блок 1 характеризует взаимосвязь рассматриваемой задачи с внешним уровнем проектирования, т.к. с позиций системного подхода выделяют два уровня проектирования: внешнее и внутреннее, которые определяют виды задач и соответствующие им математические модели [8]. Модели внешнего проектирования ориентированы на решение задач пополнения флота с учётом соответствия объёмов перевозок имеющимися ресурсам. Результатами расчётов являются тип и количество судов, обеспечивающих минимальный уровень затрат на пополнение флота, а также их проектные характеристики, в наибольшей степени влияющие на экономический эффект. Модели внутреннего проектирования ориентированы на определение элементов (главных размерений и коэффициентов полноты) судна, наилучшим образом обеспечивающих экономическую эффективность при удовлетворении требований к мореходным качествам с детализацией решений по отдельным подсистемам [7, 8]. Принадлежность задачи проектиро-

вания к определённому системному уровню определяет перечень, состав исходных данных и оптимизируемых переменных.

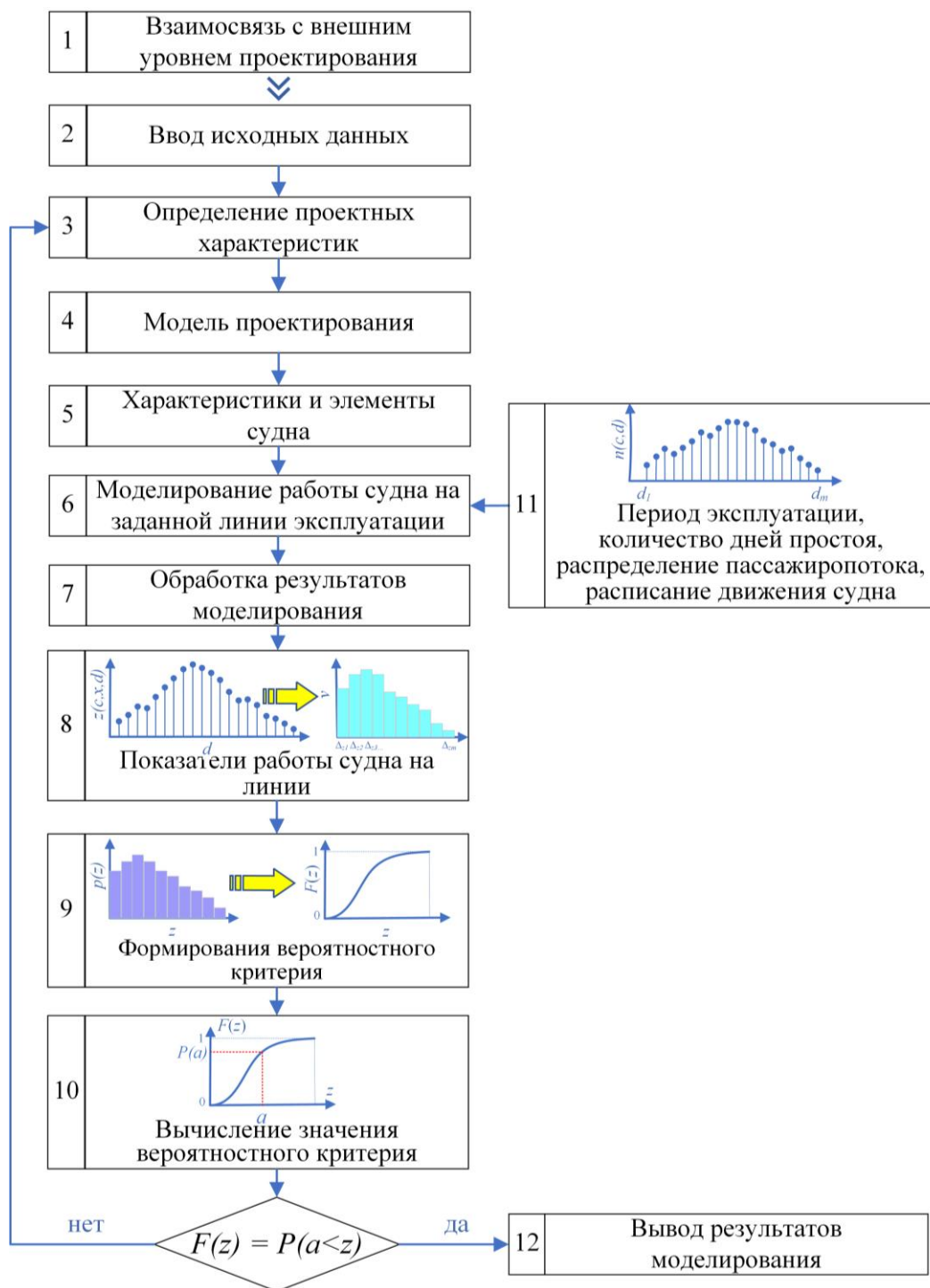


Рис. 3. Алгоритм учёта вероятностной природы данных в моделях проектирования судов

Fig. 3. Algorithm for probabilistic data account in ship design models

Решению задачи оптимизации состава и пополнения флота при минимальном уровне затрат и выполнении заданного объёма перевозок в вероятностных условиях будет посвящена отдельная статья. В настоящем исследовании рассматривается нижний уровень внешней задачи проектирования, связанный с обоснованием проектных характеристик судов (тип судна задан), а неизвестными являются скорость, пассажироместимость и количество рейсов.

Блок 2 определяет состав вектора исходных данных $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_m]$, включающего величины, характеризующие условия постройки и эксплуатации судна: нормативы стоимости материалов, работ, заработной платы экипажа, автономность и дальность плавания судна, стоимость топлива и зимнего хранения судна, цена билета, протяжённость линии и время стоянки (ожидания пассажиров), скорость движения судна в акватории порта.

Блок 3 определяет текущие значения проектных переменных $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]$, которые изменяются в зависимости от направленности принятого показателя функциональной эффективности (критерия). Здесь и далее принято: x_1 – пассажировместимость, чел.; x_2 – скорость судна в рейсе, уз.; x_3 – количество рейсов, ед.; x_4 – количество судов на линии, шт.

Блок 4 содержит совокупность аналитических и алгоритмических зависимостей, реализованных в виде отдельных файл-функций, позволяющих определять главные размерения, водоизмещение и дедвейт, мощность энергетической установки и строительную стоимость судна, что показано в работе [19].

Блок 5 обобщает результаты ранее выполненных вычислений и формирует данные, необходимые для работы имитационной модели и оценки показателей функциональной эффективности работы судна на заданной линии.

Блок 6 предназначен для расчёта эксплуатационно-экономических показателей функционирования судна на заданной линии: эксплуатационные затраты, доход от эксплуатации судна, количество увезённых / неувезённых пассажиров, заполняемость салона в рейсе, как показано в работе [20], а интегральные эксплуатационно-экономические показатели судна определялись согласно рис. 4.

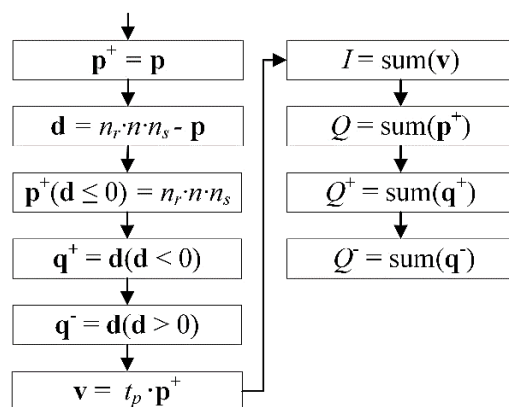


Рис. 4. Алгоритм расчёта показателей функциональной эффективности судна

Fig. 4. Algorithm of ship functional efficiency parameters calculation

На рис. 4 приняты следующие обозначения: n_r – количество рейсов, совершаемых судном в течение дня; n – пассажировместимость; n_s – количество судов на линии; t_p – стоимость перевозки одного пассажира; $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_m]$ – распределение пассажиропотока в течение года (p_i – количество пассажиров в i -й день $i = 1, \dots, m$, где m – период навигации судна); $\mathbf{d}$ – вектор отклонений суточной провозоспособности судна от фактического значения пассажиропотока для i -го дня; $\mathbf{p}^+$ – вектор значений увезённых пассажиров по дням в течение периода навигации; $\mathbf{q}^+$ – вектор значений неувезённых пассажиров в течение периода навигации (положительный потенциал в отношении увеличения прибыли); $\mathbf{q}^-$ – вектор, характеризующий распределение количества незанятых мест в i -й день в течение периода навигации; $\mathbf{v}$ – вектор распределения дохода по дням в течение периода навигации; I , Q , Q^+ , Q^- – интегральный показатель (за весь период навигации) дохода, количества перевезённых, неувезённых пассажиров и неиспользованной пассажировместимости судна соответственно.

В совокупности с эксплуатационными затратами (рассчитываемыми в имитационной модели) показатели I , Q , Q^+ , Q^- позволяют формировать набор эксплуатационно-экономических параметров сравнительной эффективности и оценивать работу судна не только с экономических, но и социальных позиций.

В блоке 7 осуществляется обработка результатов моделирования, а в случае детерминированного подхода – формирование критерия для поиска оптимального варианта судна.

В блоке 8 результаты моделирования представляются в виде столбчатых диаграмм и гистограмм, по которым определяются частоты, минимальные, средние и максимальные значения для разных сезонов и периодов эксплуатации. Частотные гистограммы далее участвуют в формировании вероятностного критерия.

В блоке 9 осуществляется формирование вероятностного критерия. Строятся функция плотности вероятностей и интегральная функция распределения для показателей, представляющих интерес для судовладельца и принятых в качестве критериев.

В блоке 10 происходит расчёт значения вероятностного критерия (вероятности того, что расчётное значение принятого показателя сравнительной эффективности примет значение меньше заданного: $F(x) = P(X < x)$). Если условие не выполняется, происходит изменение значений проектных характеристик судна, в противном случае осуществляется формирование и вывод результатов моделирования (блок 12).

Блок 11 содержит информацию о пассажиропотоке и особенностях эксплуатации судна: даты начала и окончания (продолжительность) периода навигации, годовое распределение и интенсивность пассажиропотока, количество дней простоя.

В качестве алгоритма оптимизации использован SQP-метод (от англ. Sequential Quadratic Programming – последовательного квадратичного программирования), предназначенный для поиска минимума нелинейной скалярной функции нескольких переменных с учётом линейных и нелинейных ограничений [21].

Результаты моделирования

Для оценки влияния случайных факторов и вероятностных критериев на результаты моделирования (проектные характеристики судна) решение рассматриваемой задачи выполнено в детерминированной и вероятностной постановках. В вычислительном плане при использовании оптимизационно-имитационных моделей основное отличие детерминированного подхода от вероятностного заключается в способе формирования критериев. В первом случае используются интегральные (годовые) эксплуатационно-экономические показатели, рассчитанные в блоках 1–8 (рис. 3) по алгоритму, приведённому на рис. 4. Во втором – строятся гистограммы, по которым рассчитываются функции плотности и интегральные функции распределения вероятностей, являющиеся основой для численных оценок значений критериев. Для иллюстрации предлагаемого подхода в работе рассмотрена линия «Владивосток – Попова – Рейнеке – Попова – Владивосток».

Для комплексной оценки альтернативных вариантов проектных решений, помимо экономических (эксплуатационные затраты и доход от перевозок), в исследовании учтены и социально значимые показатели функциональной эффективности (количество увезённых / неувезённых пассажиров, загрузка судна в рейсе, количество пассажиров за сезон).

Результаты решения задачи оптимизации проектных характеристик пассажирского судна с помощью оптимизационно-имитационной модели в детерминированной постановке для различных критериев показаны в табл. 1. Для примера оптимизация выполнялась на непрерывном множестве (без учёта требований к целочисленности) значений оптимизируемых переменных. В расчётах использованы следующие границы изменения значений переменных: нижняя – $lb = [50 \ 10 \ 1 \ 1]$, верхняя – $ub = [250 \ 15 \ 3 \ 3]$, начальные значения проектных переменных – $x_0 = [100 \ 13 \ 3 \ 1]$. В качестве критериев рассматривались интегральные (годовые) значения эксплуатационно-экономических показателей сравнительной эффективности работы судна за весь период навигации.

При вычислении финансовых показателей (доход и затраты) приняты следующие значения параметров, из числа исходных данных: цена билета – 280 руб./чел., стоимость топлива – 75000 руб./т, заработная плата члена экипажа – 75000 руб./мес., стоимость зимнего хранения судна – 12000 руб./мес. Стоимость проезда соответствует фактическому значению (по состоянию на 2025 г.) и принята с учётом субсидии, выплачиваемой компанией-перевозчику адми-

нистрацией города Владивостока. Проектная скорость хода (развиваемая при номинальной мощности ГД) для всех вариантов принята одинаковой – 25 уз.

Таблица 1/ Table 1

Результаты оптимизации проектных характеристик судна
Results of ship design characteristics optimization

Критерий	$I \rightarrow \max$	$Q^+ \rightarrow \min$	$Q^- \rightarrow \min$	$Q \rightarrow \max$	$3 \rightarrow \min$
I , млн руб.	16,723	16,723	4,168	16,724	12,129
Q^+ , тыс. чел.	0	0	44,841	0	16,408
Q^- , тыс. чел.	198,810	243,593	0,664	243,593	19,503
Q , тыс. чел.	59,727	59,727	14,886	59,727	43,318
3 , руб./чел.	1176	1336	657	1336	294
n , чел.	168,83	190,92	50	190,92	67,33
V_s , уз.	12,18	12,37	10,81	12,37	10,00
n_r , ед.	2,1	2,17	1	2,17	3
n_s , шт.	2,34	2,35	1	2,35	1

В табл. 2 показаны результаты расчёта эксплуатационно-экономических показателей функциональной эффективности судна для случая, когда значения проектных переменных округлялись до целого в большую и меньшую сторону по отношению к решению, полученному в непрерывной постановке.

Таблица 2/ Table 2

Результаты оптимизации проектных характеристик судна
Results of ship design characteristics optimization

Критерии / переменные	I		Q^+		Q^-		Q		3	
	$x_{\max}$	$x_{\min}$	$x_{\max}$	$x_{\min}$	$x_{\max}$	$x_{\min}$	$x_{\max}$	$x_{\min}$	$x_{\max}$	$x_{\min}$
I , млн руб.	16,723	16,723	16,723	16,723	4,168	4,168	16,723	16,723	12,199	12,094
Q^+ , тыс. чел.	0	0	0	0	44,841	44,841	0	0	16,159	16,535
Q^- , тыс. чел.	413,304	149,265	474,882	176,633	0,664	0,664	474,882	176,633	19,876	19,319
Q , тыс. чел.	59,727	59,727	59,727	59,727	14,886	14,886	59,727	59,727	43,568	43,192
3 , руб./чел.	1684	954	1888	1073	659	651	1888	1073	294	294
n , чел.	169	168	191	190	50	50	191	190	68	67
V_s , уз.	13	12	13	12	11	10	13	12	10	10
n_r , ед.	3	2	3	2	1	1	3	2	3	3
n_s , шт.	3	2	3	2	1	1	3	2	1	1

Анализ результатов решения задачи оптимизации характеристик судна в детерминированной постановке позволяет сделать следующие выводы:

- оптимальные значения проектных характеристик судна во многом определяет принятый критерий функциональной эффективности;
- для всех рассматриваемых вариантов проектных характеристик пассажировместимость судна не превышает 191 чел.;
- экономически эффективная эксплуатационная скорость хода судна на рассматриваемой линии находится в диапазоне $10 \div 13$ уз.;
- количество рейсов, совершаемых судном в течение дня, зависит от пассажировместимости и для всех вариантов лежит в диапазоне $1 \div 3$;
- количество судов, необходимых для обеспечения заданного объёма перевозок пассажиров, для всех случаев составляет $1 \div 3$.

Сравнивая расчётные показатели и характеристики с фактическими данными катамарана «Москва», отметим следующее:

– фактическая скорость хода катамарана «Москва» на рассматриваемой линии (в том числе при выходе из зоны действия ограничений, действующих в акватории порта Владивосток) составляет 12 уз. [11];

– количество рейсов в начале и конце периода навигации (за исключением периода активной навигации – июль-август) составляет 1–3 рейса в день;

– результаты вычислений, приведённые в табл. 1, 2, показывают, что пассажироместимость катамарана «Москва» (220 человек) при существующем пассажиропотоке избыточна и не позволяет выстраивать гибкий график работы судна.

Далее для сравнения приведём решение задачи оптимизации проектных характеристик судна в вероятностной постановке. Постановку задачи при этом запишем следующим образом: необходимо найти такое сочетание компонентов вектора оптимизируемых переменных $\mathbf{x}^*$, при котором целевая функция $F(\mathbf{x}^*)$, отражающая функциональную эффективность судна под воздействием случайных факторов $\mathbf{p}$, достигает своего экстремального значения.

В такой постановке возможен один из двух подходов к формированию критерия:

– максимизация вероятности получения значения целевой функции не выше заданного уровня (для минимизируемых показателей эффективности): $P(X \leq a) = F(a)$;

– максимизация вероятности получения значения целевой функции не ниже заданного уровня (для максимизируемых показателей эффективности): $P(X \geq a) = 1 - F(a)$.

Из вышесказанного следует, что в вероятностной постановке необходимо предварительно задать пороговую оценку для обеспечения желаемого уровня принятого критерия эффективности, которая, в свою очередь, определяет как надёжность функционирования судна, так и степень риска судовладельца. Под надёжностью понимается свойство судна как сложной системы сохранять значения основных эксплуатационно-экономических показателей в пределах, гарантирующих (с определённой вероятностью) достижение определённого уровня эффекта.

На рис. 5 показаны графики годового распределения (в период летней навигации 2022 года) пассажиропотока в прямом и обратном переходе, а на рис. 6 – результаты вычислений, выполненных в предположении, что доход, получаемый от эксплуатации пассажирского судна за рейс (без учёта субсидий со стороны администрации г. Владивостока), должен составлять не менее 175 тыс. руб. Анализируя график интегральной функции распределения (см. рис. 6b), получаем значение вероятности, равное 20%, т.к. такой доход ожидаем только в случае перевозки не менее 625 пассажиров в сутки, что не всегда согласуется в реальными суточными значениями пассажиропотока (средние значения в прямом и обратном переходе составляют 194 и 190 чел./сутки соответственно).

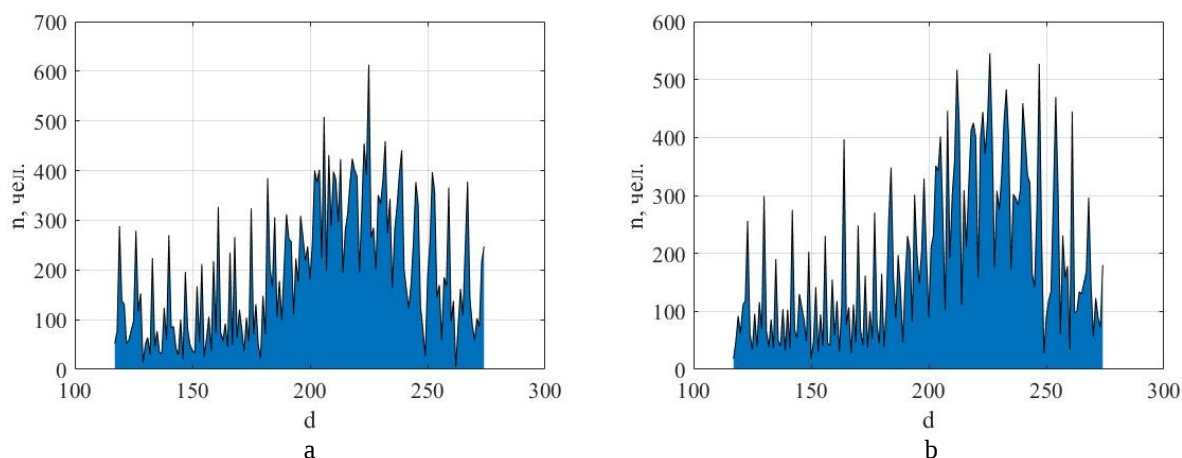


Рис. 5. Распределение пассажиропотока в период летней навигации:
a – прямой пассажиропоток; b – обратный пассажиропоток

Fig. 5. Distribution of passenger traffic during the summer navigation:
a – direct passenger traffic; b – reverse passenger traffic

Результаты тестовых расчётов, говорят о том, что, как и в случае детерминированной постановки задачи оптимизации проектных характеристик судна, использование одного критерия эффективности (пусть даже вероятностного) не является приемлемым с практической точки зрения, т.к. в полной мере определяет направленность поиска оптимальных значений проектных переменных, например больший доход и объём перевозок будут соответствовать большей пассажироместимости, а наименьшие эксплуатационные затраты и строительная стоимость будут соответствовать суду с наименьшей пассажироместимостью [22].

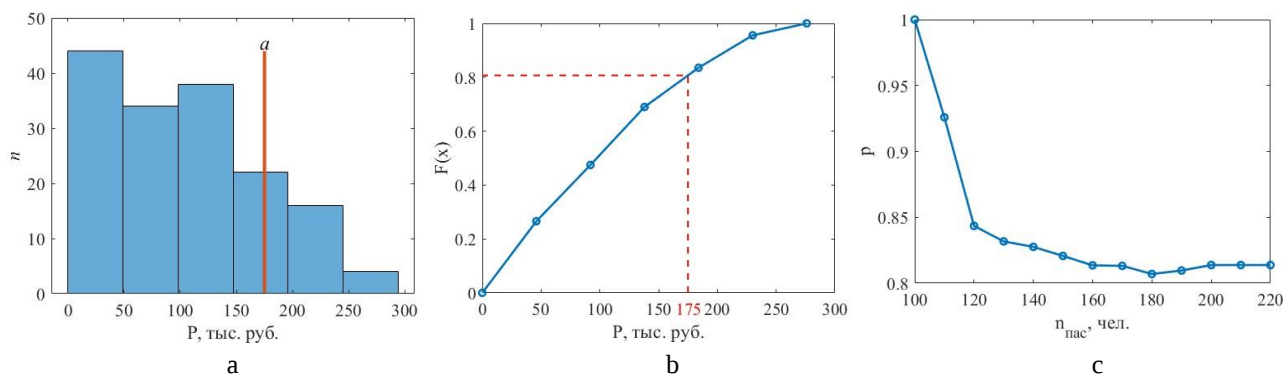


Рис. 6. Расчёт вероятностного критерия:
а – гистограмма критерия эффективности; б – интегральная функция;
с – зависимость вероятности от пассажироместимости

Fig. 6. Calculation of probabilistic criteria:
 а – histogram of the criteria; б – integral function;
 с – dependence of the probability of passenger capacity values

Из вышесказанного следует, что задачу проектирования судна необходимо решать в многокритериальной постановке с целью поиска оптимально-компромиссных вариантов решений, учитывающих требования нескольких критериев различной направленности, в том числе учитывающих социальный эффект (количество увезённых / неувезённых пассажиров). Т.е. каждый критерий будет характеризовать определённый показатель или функциональные качества судна: $F(X) = [F_1(X), F_2(X), \dots, F_m(X)]$. В этом случае вероятность безотказной работы судна за рассматриваемый период времени будет определяется по формуле:

$$P_{LT}(X) = \prod_{j=1}^m P_j(x),$$

где $P_j(x)$ – вероятность удовлетворения j -го условия работоспособности.

Условие выбора оптимального варианта судна запишем в следующем виде:

$$P_{LT}(x^*) = \max P_{LT}(x).$$

Таким образом, показателем, определяющим эксплуатационную надёжность судна в вероятностных условиях, является вероятность безотказной работы (P_{LT}) – вероятность того, что параметры, определяющие работоспособность судна, находятся в пределах допустимой области в течение рассматриваемого периода времени $t \in (0, T)$.

Заключение

В статье рассмотрены основные подходы и эволюция расчётных методов теории проектирования судов. Особо отмечена роль блочно-иерархического подхода и информационных технологий в судостроении. Отмечены причины возникновения, виды и необходимость учёта неопределённости при проектировании судов. Рассмотренный алгоритм учёта вероятностной природы исходных данных в моделях проектирования судов является основой для формирования критериев эффективности, определяющих эксплуатационную надёжность будущего судна.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

М.В. Китаев – разработка концепции исследования, подготовка и редактирование текста; В.Г. Бугаев – разработка концепции исследования и редактирование текста; И.А. Новосельцев – сбор данных, анализ и интерпретация результатов; Н.Р. Лиходедова – обработка исходных данных и результатов моделирования; С.Е. Черныхович – сбор и обработка исходных данных. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

M.V. Kitaev – development of the study concept, preparation and editing of the text; V.G. Bugaev – development of the study concept and editing of the text; I.A. Novoseltcev – data collection, analysis and interpretation of results; N.R. Likhodedova – processing of the initial data and modeling results; S.E. Chernyakhovich – collection and processing of the initial data. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Evans J. Harvey. Basic design concepts // Journal of the American Society for Naval Engineers. 1959. Vol. 71, iss. 4. P. 671–678.
2. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. В 2 т. Т. 2. Анализ и синтез системы «Корабль». СПб.: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2017. 872 с.
3. Watson D.G.M. Practical ship design. Volume 1 (Elsevier Ocean Engineering Series). 1st edition // Elsevier. 1998. 531 p.
4. Большие страны должны сами проектировать суда // Информационное аналитическое агентство ИАА «ПортНьюс». URL: <https://portnews.ru/comments/3251/> (дата обращения: 07.05.2025).
5. Brett P.O., Gaspar H.M., Ebrahimi A. & Garcia J.J. Disruptive market conditions require new direction for vessel design practices and tools application // Proceedings of the 13th International Marine Design Conference (IMDC 2018), 10–14 June 2018. Espoo, Finland. P. 31–47.
6. Pawling R., Percival V., Andrews D. A study into the validity of the ship design spiral in early-stage ship design // Journal of Ship Production and Design. 2019. Vol. 33, iss. 2. P. 81–100.
DOI: <https://doi.org/10.5957/JSPD.33.2.160008>
7. Пашин В.М. Оптимизация судов. Л.: Судостроение, 1983. 296 с.
8. Вашедченко А.Н. Автоматизированное проектирование судов. Л.: Судостроение, 1985. 164 с.
9. Pawling R. “Are You Sure About That?”: Handling uncertainty in an early-stage ship design process // International Marine Design Conference. 2024. DOI: <https://doi.org/10.59490/imdc.2024.821>
10. de Geus-Moussault S., Seubers H., Linsken H., Coraddu A., Pruyn J. Operational data for sea margin calculations in early ship design // International Marine Design Conference. 2024.
DOI: <https://doi.org/10.59490/imdc.2024.882>
11. Agis J.J.G., Pettersen S.S., Rehn C.F., Ebrahimi A. Handling commercial, operational and technical uncertainty in early-stage offshore ship design // 11th System of Systems Engineering Conference (SoSE). 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/sysose.2016.7542950>
12. Rubinstein Reuven Y. and Kroese, Dirk P. Simulation and the Monte Carlo method. 3rd ed. Hoboken, NJ, United States, John Wiley and Sons, 2017. 396 p.
13. Бугаев В.Г., Китаев М.В. Оптимизация элементов и характеристик судов с учётом случайных факторов // Морские интеллектуальные технологии. 2011. № 1. С. 41–47.
14. Brett P.O., Garcia Agis J.J., Lagemann B. Early marine systems’ design – cracking the wicked problem. The case of a novel biomass harvesting vessel // International Marine Design Conference. 2024. DOI: <https://doi.org/10.59490/imdc.2024.851>
15. Бугаев В.Г., Дам Ван Тунг, Бондаренко Ю.В. Оптимизация характеристик и элементов рыболовных судов с учётом случайных факторов их функционирования // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 1(46). С. 24–35.
DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2021-1-3>
16. Тимофеева Г.А. Вероятностные решения задач условной оптимизации // Труды института математики и механики УрО РАН. 2020. Т. 26. № 1. С. 198–211.
17. Gaspar H.M., Brett P.O., Ebrahim A., Keane A. Data-driven documents (D3) applied to conceptual ship design knowledge // Proceedings COMPIT. 2014. P. 569–583.

18. Gaspar H.M., Fonseca Ícaro A., Andrews D. Wither now the Design Building Block (DBB) approach // *International Marine Design Conference*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.59490/imdc.2024.915>
19. Ха Ван З., Китаев М.В. Математическая модель оптимизации проектных характеристик скоростных пассажирских катамаранов // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2020. № 3(44). С. 46–59.
20. Новосельцев И.А., Китаев М.В. Оценка эффективности пассажирского судна с использованием методов имитационного моделирования // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2024. № 4(61). С. 40–53.
21. Boggs P.T., Tolle J.W. Sequential quadratic programming // *Acta Numerica*. 1995. Vol. 4. P. 1–51.
22. Китаев М.В., Новосельцев И.А. Применение методов многокритериальной оптимизации для решения задачи проектирования судна // *Научные проблемы водного транспорта*. 2023. № 75. С. 66–75.

REFERENCES

1. Evans J. Harvey. Basic design concepts. *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 1959, vol. 71, iss. 4, pp. 671–678.
2. Gaikovich A.I. Design theory of displacement ships and vessels. Issue 2. Volume 2. Analysis and synthesis of the “Ship” system. St. Petersburg, Publishing House of the Research Center Morintech, 2017. 872 p. (In Russ.).
3. Watson D.G.M. Practical ship design. Volume 1 (Elsevier Ocean Engineering Series). 1st ed. Elsevier. 1998. 531 p.
4. Large countries should design their own ships. *Information Analytical Agency IAA “PortNews”*. (In Russ.). URL: <https://portnews.ru/comments/3251/>
5. Brett P.O., Gaspar H.M., Ebrahimi A., Garcia J.J. Disruptive market conditions require new direction for vessel design practices and tools application. *Proceedings of the 13th International Marine Design Conference (IMDC 2018)*, 10–14 June 2018. Espoo, Finland. P. 31–47.
6. Pawling R., Percival V., Andrews D. A study into the validity of the ship design spiral in early-stage ship design. *Journal of Ship Production and Design*, 2019, vol. 33, iss. 2, pp. 81–100. <https://doi.org/10.5957/JSPD.33.2.160008>
7. Pashin V.M. Ship optimization. Leningrad: Sudostroenie, 1983, 296 p. (In Russ.).
8. Vashedchenko A.N. Automated ship design. Leningrad: Sudostroenie, 1985, 164 p. (In Russ.).
9. Pawling R. “Are You Sure About That?”: Handling uncertainty in an early-stage ship design process. *International Marine Design Conference*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.59490/imdc.2024.821>
10. de Geus-Moussault S., Seubers H., Linsken H., Coraddu A., Pruyn J. Operational data for sea margin calculations in early ship design. *International Marine Design Conference*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.59490/imdc.2024.882>
11. Agis J.J.G., Pettersen S.S., Rehn C.F., Ebrahimi A. Handling commercial, operational and technical uncertainty in early-stage offshore ship design. *11th System of Systems Engineering Conference (SoSE)*, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/sysose.2016.7542950>
12. Rubinstein Reuven Y. and Kroese, Dirk P. Simulation and the Monte Carlo method. 3rd ed. Hoboken, NJ, United States: John Wiley and Sons. 2017. 396 p.
13. Bugaev V.G., Kitaev M.V. Optimization of ship elements and characteristics taking into account random factors. *Marine Intellectual Technologies*, 2011, no. 1, pp. 41–47. (In Russ.).
14. Brett P.O., Garcia Agis J.J., Lagemann B. Early marine systems’ design – cracking the wicked problem. The case of a novel biomass harvesting vessel. *International Marine Design Conference*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.59490/imdc.2024.851>
15. Bugaev V.G., Dam Van Tung, Bondarenko Yu.V. Optimization of the characteristics and elements of fishing vessels taking into account random factors of their functioning. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2021, no. 1(46), pp. 24–35. (In Russ.). DOI: <http://www.doi.org/10.24866/2227-6858/2021-1-3>
16. Timofeeva G.A. Probabilistic solutions to constrained optimization problems. *Proceedings of the Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 198–211. (In Russ.).
17. Gaspar H.M., Brett P.O., Ebrahim A., Keane A. Data-driven documents (D3) applied to conceptual ship design knowledge. *Proceedings COMPIT*, 2014, pp. 569–583.
18. Gaspar H.M., Fonseca Ícaro A., Andrews D. Wither now the Design Building Block (DBB) approach. *International Marine Design Conference*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.59490/imdc.2024.915>

19. Ha Van Duy, Kitaev M.V. A mathematical model for optimizing the design characteristics of high-speed passenger catamarans. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2020, no. 3(44), pp. 46–59. DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-3-5>
20. Novoseltsev I.A., Kitaev M.V. Evaluating the efficiency of a passenger vessel using simulation modeling methods. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 4 (61), pp. 40–53. (In Russ.).
21. Boggs P.T., Tolle J.W. Sequential quadratic programming. *Acta Numerica*, 1995, vol. 4, pp. 1–51.
22. Kitaev M.V., Novoseltsev I.A. Application of multicriteria optimization methods to solving a vessel design problem. *Scientific Problems of Water Transport*, 2023, no. 75, pp. 66–75. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Китаев Максим Владимирович – кандидат технических наук, доцент, профессор Департамента морской техники и транспорта, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ kitaev.mv@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5345-6333>

Maksim V. Kitaev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Marine Engineering and Transport of Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

Бугаев Виктор Григорьевич – доктор технических наук, профессор, профессор Департамента морской техники и транспорта, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ bugaev.vg@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8778-620X>

Victor G. Bugaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Department of Marine Engineering and Transport of Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Новосельцев Игорь Александрович – аспирант Департамента морской техники и транспорта, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ novoseltcev.ia@dvfu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-5014-2684>

Igor A. Novoseltcev, Graduate Student, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Лиходедова Наталья Романовна – аспирант Департамента морской техники и транспорта, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ likhodedova.nr@dvfu.ru

Natalya R. Likhodedova, Graduate Student, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Черняхович Станислав Евгеньевич – доцент Департамента морской техники и транспорта, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ sboats@mail.ru

Stanislav E. Chernyakhovich, Associate Professor, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию / Received: 23.09.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 26.09.2025.

Принята к публикации / Accepted: 26.09.2025