

УДК 629.5.01
EDN PELJHW

ОБЗОР РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ И ОБСУЖДЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

О.В. Таровик, канд. техн. наук, ООО «Бюро Гиперборея», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., 6А, пом. 511, e-mail: oleg.tarovik@bureauhyperborea.ru

В статье описывается ход развития теории и практики раннего проектирования судов за последние 50 лет, анализируются основные отечественные и зарубежные источники. Последовательно обсуждаются особенности аналитического, оптимизационного и системотехнического подходов к постановке и решению проектной задачи, рассматриваются применяемые при различных подходах прикладные инструменты. Выполняется сопоставительный анализ трех указанных подходов, делаются предположения о дальнейших путях развития теории и практики проектирования с использованием технологий искусственного интеллекта и цифрового дублирования. Анализируются причины некоторой инертности теории проектирования судов в современных российских условиях и определенной паузы в создании прикладных инструментов для концептуального проектного анализа. Делается вывод о возможности дальнейшего развития теории проектирования судов с применением современных информационных и программных технологий.

Ключевые слова: теория проектирования судов, история развития, оптимизация судов, системотехнический подход, цифровой двойник проекта, методы искусственного интеллекта.

Для цитирования: Таровик О.В. Обзор развития теории проектирования судов и обсуждение перспектив создания цифровых проектных решений / О.В. Таровик // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 124 — 136. — EDN PELJHW.

REVIEW OF THE EVOLUTION OF SHIP DESIGN THEORY AND DISCUSSION OF THE PROSPECTS OF DIGITAL DESIGN SOLUTIONS

O.V. Tarovik, PhD, Bureau Hyperborea LLC, 191015 Russia, St. Petersburg, Kavalergardskaya ul., 6A, pom. 511, e-mail: oleg.tarovik@bureauhyperborea.ru

This article describes the evolution of the theory and practice of early ship design over the past 50 years, and analyzes the main Russian and foreign sources. The features of the analytical-, optimization- and system-based approaches to the formulation and solution of the design problem are consistently discussed, and the applied tools used in different approaches are described. A comparative analysis of these three approaches is carried out. Several assumptions are made about the ways for further development of the theory and practice of ship design using artificial intelligence and digital duplication technologies. The article also analyzes the reasons for some inertia of the ship design theory in modern Russia and a certain pause in the development of applied tools for conceptual ship design and analysis. A conclusion is made about the possibility for further development of ship design theory using modern information and software technologies.

Keywords: ship design theory, history of development, ship optimization, system-based approach, digital twin, artificial intelligence.

For citation: Tarovik O.V. Review of the evolution of ship design theory and discussion of the prospects of digital design solutions. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 124 — 136. EDN PELJHW. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Отечественное гражданское судостроение развивается в сложных условиях, которые сформировались из-за отсутствия ряда важных позиций судового и судостроительного оборудования, а также нелегкой конкуренции с более мощной индустрией азиатских стран. Непростые условия создания конечного продукта неизбежно спровоцировали и некоторую инертность теории проектирования судов — научной дисциплины, посвященной формированию принципиального облика судна и его оптимизации в составе транспортной системы. Известно, что ранние этапы проектирования судна исключительно важны, поскольку в ходе их выполнения принимаются концептуальные решения, которые во многом определяют будущую эффективность всего проекта. Однако не до конца изжитые последствия ослабления отечественной школы исследовательского проектирования в 1990-х гг. привели к тому, что в настоящее время новых разработок в этой сфере в России практически не появляется, а зарубежные методические наработки остаются во многом неизвестными отечественному судостроительному сообществу.

Настоящая статья призвана хотя бы отчасти заполнить этот пробел и описать развитие теории и практики раннего проектирования судов за последние 50 лет, обобщив основные отечественные и иностранные источники. Несмотря на сложность формального анализа процесса проектирования, который, как известно, является одновременно и технологическим, и творческим [1], имеющаяся литература позволяет достаточно точно проследить происходившую в этой области смену парадигм и принципиальных подходов. Сразу оговоримся, что под проектированием далее понимаются ранние стадии этого процесса, то есть концептуальный, эскизный и отчасти технический (по нормам классификационного общества) проекты. По степени детализированности и разнообразию возможных решений они сильно отличаются от более поздних этапов, на которых основное внимание уделяется соответствию проекта большому количеству норм, правил и стандартов, а также информационному обмену между проектантом и строителем судна [2].

В качестве основы для классификации подходов к проектированию судна принята работа проф., д.т.н. А.И. Гайковича [3], в которой было предложено выделять аналитический, оптимизационный и системотехнический подходы. Стоит также отметить, что границы приведенных далее этапов развития теории и практики проектирования судов не являются четкими, поскольку для этой сферы в целом характерно смешение и взаимопроникновение различных концепций, а также сильная связь теоретических подходов с имеющимися прикладными инструментами.

Дальнейшее изложение строится следующим образом. В разделах 1, 2 и 3 последовательно описываются особенности аналитического, оптимизационного и системотехнического подходов в части постановки и решения проектной задачи, а также применяемых прикладных методов. Краткий сопоставительный анализ трех указанных подходов выполнен в разделе 4. Возможные направления дальнейшего развития теории проектирования обозначены в разделе 5, а заключительный раздел посвящен обсуждению перспектив создания цифровых решений для выполнения прикладного проектного анализа, а также их влияния на дальнейшее развитие теории проектирования судов.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Согласно [3], период до 1960-х гг. включительно соответствует этапу докомпьютерного «аналитического проектирования». Основной особенностью аналитического подхода является представление проектируемого судна набором статистических, эмпирических и аналитических уравнений, характеризующих отдельные качества проекта: водоизмещение, вместимость, остойчивость, ходкость и др. [4]. Суть аналитического подхода обусловлена спецификой постановки задачи проектирования, которая в этот период формулируется в виде вопроса о том, какими должны быть детальные характеристики судна, чтобы удовлетворить заданным требованиям технического задания (ТЗ), то есть обеспечить требуемую грузоподъемность, скорость хода, ледопроходимость и другие базовые технико-эксплуатационные показатели [4]. Решение проектной задачи при таком подходе достигается в ходе эвристического поиска рационального компромисса между противоречивыми требованиями к различным качествам судна, отдельное улучшение каждого из которых приводит к ухудшению других. Сам процесс проектирования формализуется в виде традиционной «проектной спирали» [5] и «метода последовательных приближений» [4], которые иллюстрируют циклический характер процесса создания судна и необходимость уточнения его характеристик по мере накопления информации о проекте и разрешения проектных противоречий.

Прикладные методы аналитического подхода строились исходя из того, что требования ТЗ выступают некой данностью, которой необходимо соответствовать, а вопрос о том, насколько они рациональны с точки зрения интегральной эффективности судна, считался выходящим за рамки проектной задачи и решался в отдельной постановке — в ходе технико-экономического обоснования (ТЭО) проекта [6]. Назначение судна, его грузоподъемность, скорость хода, тип энергетической установки и другие важнейшие параметры ТЗ в ходе ТЭО определялись, как правило, аналитически по критерию приведенных затрат. В качестве практических инструментов использовались такие технологии, как оценка провозоспособности судна на линии, анализ структуры грузопотоков и тенденций развития флота [6].

В рамках описываемого докомпьютерного периода было разработано множество прикладных аналитических и статистических методов для оценки самых разнообразных качеств проектируемого судна — от соотношений главных размерений и коэффициентов полноты до нагрузки масс судна порожнем [4]. Пересчет с судна-прототипа использовался как одна из базовых технологий проектирования, причем соответствующие алгоритмы пересчета были созданы практически для всех качеств судна, включая остойчивость, непотопляемость и даже кривые теоретического чертежа [7]. Полуэмпирическая по своей сути методология

использования прототипа была проработана в такой степени, что при отсутствии близкого прототипа предлагалось его специально спроектировать, а затем путем пересчета максимально приблизить характеристики проекта к требованиям ТЗ.

Главной задачей, на решение которой направлялся весь методический аппарат начального проектирования, было повышение точности предсказания значений проектных параметров, так как от этого зависит трудоемкость дальнейших детальных этапов [4]. Однако потенциал увеличения точности аналитического подхода ограничен его собственными методическими особенностями. Например, известно, что пересчет нагрузки масс с разных судов-прототипов на одно и то же проектируемое судно с использованием одних и тех же методик пересчета практически гарантированно приводит к разным результатам. Также отметим, что характерной особенностью отечественной школы аналитического проектирования было широкое использование дифференциальной формы для представления уравнений, описывающих различные качества судна [4], чего не наблюдалось у зарубежных авторов [8, 9].

2. ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД

С появлением первых вычислительных мощностей и на фоне развития математических методов исследования операций в 1970-х гг. начинается этап «оптимизационного проектирования» [3]. Проектная задача рассматривается в контексте поиска наилучшего решения в многомерном аналитическом пространстве в условиях противоречивости различных требований к судну. Процесс оптимизации охватывает как характеристики самого судна («внутренняя задача»), так и параметры морской транспортной системы (МТС) («внешняя задача»), в составе которой судно должно работать наиболее эффективно [10]. Параметрами внутренней оптимизационной задачи являются, например, соотношения главных размерений, параметры общего расположения и коэффициенты полноты, а в рамках внешней задачи производится поиск оптимальных значений параметров ТЗ [11]. То есть на данном этапе в сферу практических интересов проектантов попадает вопрос формального обоснования требований технического задания, который ранее столь подробно не рассматривался в контексте непосредственного проектирования судна. Изменение принципиального подхода к проектированию оказалось возможным благодаря появлению технологий для массового расчетного варьирования характеристик судна с использованием первых электронно-вычислительных машин. Критерием оптимизации в подавляющем большинстве случаев выступала экономическая эффективность [12, 13], а для поиска решения использовались различные методы нелинейного математического программирования [14]. Отметим, что из решения «внешней» задачи проектирования с применением методов дискретной комбинаторной оптимизации в зарубежной практике далее выросла отдельная школа морской логистики, посвященная проблемам определения состава флота (fleet sizing) и составления расписаний (vehicle scheduling) [15].

С точки зрения технологий проектирования на оптимизационном этапе происходит широкое внедрение регрессионных моделей взамен графических и табличных данных, что, собственно, и позволяет создавать аналитическое пространство для поиска оптимального решения на основе формальной математической модели. Например, оцифровываются диаграммы для пробора гребных винтов по результатам серийных испытаний [16], предлагаются регрессионные модели для расчета сопротивления воды [17], массы металлического корпуса [9], ледопроеходимости [18] и других параметров проектируемого судна. Также в этот период появляются компьютерные модели судовой поверхности [19], благодаря которым существенно ускоряется работа с геометрией обводов по сравнению с чертежно-графическим методом построения теоретического чертежа (ТЧ), применявшимся на докомпьютерном этапе. Модели судовой поверхности обеспечили возможность параметрического управления деталями формы обводов, а не только интегральными гидростатическими характеристиками корпуса, как это было ранее [20]. В 1970-х гг. судовая поверхность моделируется преимущественно с использованием узкоспециализированных аналитических подходов [21], однако к 2000-м гг. в судостроении окончательно закрепляются универсальные NURBS-модели [22], допускающие параметризацию и дальнейшую оптимизацию обводов с помощью методов численной гидродинамики [23].

Основным результатом оптимизационного этапа периода 1970 — 1990-х гг. стало кардинальное изменение облика транспортного флота 1990-х по сравнению с периодом 1960-х. Сформировались характерные схемы общего расположения с кормовым размещением машинного отделения, многократно возросли размеры и грузоемкости судов, увеличились коэффициенты полноты, стали широко применяться носовые бульбы, были существенно оптимизированы формы обводов и снижены расходы топлива.

Значительные изменения затронули конструкционные материалы, судовое оборудование и системы различного назначения. Морская и береговая логистика стали тесно увязаны в единую интермодальную цепочку, которая накладывает дополнительные проектные ограничения на судно и на этапе проектирования, и в ходе эксплуатации. Наиболее ярко это проявилось в масштабной контейнеризации перевозок сухих грузов. В целом можно сказать, что принципиальный проектный облик современных транспортных судов практически всех типов (танкеры, газовозы, универсальные сухогрузы, контейнеровозы и мн. др.) окончательно сформировался к концу 1990-х – началу 2000-х гг. В дальнейшие годы развитие происходило главным образом за счет увеличения размеров, перехода на новые виды топлива (преимущественно СПГ) и исследования различных решений для повышения энергетической эффективности (кайтовые и роторные паруса, солнечные батареи и т.п.) [24]. Современная проблематика проектирования находится в основном в области анализа влияния этих аспектов на архитектурно-конструктивный тип и характер эксплуатации сложившихся ранее типов судов.

3. СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИЙ ПОДХОД

В 1990-х гг., одновременно с внедрением технологий объектно-ориентированного программирования (ООП) [25], ростом вычислительных возможностей компьютерной техники, появлением графических пользовательских интерфейсов, зарождаются тяжелые судостроительные САПР, а сам процесс проектирования постепенно переходит в цифровую форму. С одной стороны, происходит автоматизация и компьютеризация рутинных процессов проектирования [26], а с другой — многие приближенные аналитические методики, применявшиеся до этого на ранних этапах, перестают быть безальтернативными и зачастую заменяются прямым расчетом или численным моделированием. Это позволило, по утверждению акад. В.М. Пашина, «резко уменьшить зависимость от прототипов и статистических формул» [1]. В области концептуального проектирования судов начинается этап, названный в [3] «системотехническим», поскольку он предполагает рассмотрение судна как сложной технической системы, включающей различные подсистемы и функционирующей во внешней среде [27]. Под внешней средой понимается все многообразие технических, экономических, социальных и природных систем, с которыми взаимодействует проектируемое судно [28]. Таким образом, основным отличием системотехнического подхода от оптимизационного является выход за рамки конкретной аналитической постановки оптимизационной задачи и многократное увеличение количества информации и числа учитываемых факторов.

Начиная с 1990-х гг. в связи с объективными геополитическими причинами отечественная школа проектирования судов приобретает инертный характер [29], а основные методические разработки создаются за рубежом. Интересно отметить, что практически все новые идеи зарубежных авторов обсуждались в ходе международных конференций IMDC (International Marine Design Conference), по материалам которых можно достаточно подробно проследить ход мысли проектантов с момента первой конференции в 1982 г. и до настоящего времени [30].

Однако стоит сказать, что в 1990-х и первой половине 2000-х гг. во всем мире наблюдался определенный спад темпов развития методологии раннего проектирования, что обусловлено, на наш взгляд, глубоким изменением требований к специалисту-проектанту. Если до этого основная квалификация такого специалиста лежала в области судостроительных дисциплин и классической математики, то по мере компьютеризации процесса проектирования стала возникать острая необходимость в понимании не только технологий программной реализации простых инженерных приложений, но и новых математических методов, принципов ООП и архитектуры программных решений [31]. Поэтому основное развитие в период 1990-х гг. приходится на тяжелые судостроительные САПР (CAD/CAM/CAE-системы), создаваемые специализированными ИТ-компаниями на стыке программной разработки и судостроительных дисциплин. Основной задачей САПР-систем с момента их появления и до нынешнего времени является сопровождение детальных этапов проектирования (техно-рабочий и рабочий), поскольку именно они являются наиболее трудоемкими и для них компьютеризация позволяет добиться наибольшего экономического эффекта. При этом в 1990-х гг. задачи концептуального проектирования продолжали решаться в основном с использованием созданных ранее подходов, но с применением новых компьютерных инструментов.

К 2010-м гг. происходит накопление «критической массы» развития прикладных программных технологий и одновременное ознакомление с ними судостроительного сообщества. Появляется целый ряд новых подходов к проектированию, основанных на системотехнических принципах, реализация которых была бы невозможна без использования цифровых технологий. Происходит разделение обобщенного теорети-

ческого системотехнического подхода (system-based design) на различные прикладные разновидности, в рамках каждой из которых акцент ставится на той или иной составляющей судна или окружающей его внешней среды. Например, выделяются цель-ориентированный (goal-based design) [32], риск-ориентированный (risk-based design) [33, 34] и миссия-ориентированный (mission-based design) [35] подходы. Всех их объединяет та или иная степень учета морской транспортной системы, в составе которой работает судно, однако в некоторых случаях на этой составляющей делается особый акцент. В частности, в [36] изложена концепция логистически-ориентированного (logistics-based) подхода, призванного наладить взаимодействие между традиционно различными взглядами на судно со стороны условного «логиста» и условного «проектанта», в том числе при проектировании судов для работы в интермодальной транспортной системе [37]. Концепция междисциплинарного подхода, объединяющего проектный анализ и имитационное транспортно-логистическое моделирование работы судна во льдах, предложена в [38]. Примеры реализации этой концепции в рамках прикладных исследовательских проектов можно найти в [39] и [40].

Одной из основных особенностей прикладных моделей системотехнического типа является использование вариантного поиска наилучшего решения вместо формальной математической оптимизации в аналитическом пространстве, типичной для предыдущего этапа. Это обусловлено, на наш взгляд, двумя основными причинами. Во-первых, высокая вычислительная сложность проектных моделей судов и моделей их эксплуатации во внешней среде, обусловленная стремлением учесть множество факторов, затрудняет нахождение формального оптимума за разумное время. Во-вторых, отмеченные выше результаты оптимизационного этапа существенно ограничили возможность дальнейшего использования аналитических оптимизационных моделей из-за того, что процесс формальной оптимизации основных проектных характеристик судна оказался стеснен (1) ограничениями на габариты судов (образовались стандартные типоразмеры, такие как Handysize, Panamax, Aframax и др.), (2) размерами товарной партии перевозимого груза, на которую стала ориентироваться береговая часть логистической цепочки (например, европейская портовая инфраструктура СПГ ориентирована на единичную партию в размере 150 — 170 тыс. м³), (3) нецелесообразностью снижения скорости хода ниже экономичной (10 — 12 уз) и (4) традиционными сроками доставки грузов, которые ограничили возможности изменения проектных скоростей хода. В результате, в большинстве случаев предпочтительными оказываются либо граничные, либо логистически обусловленные значения основных проектных характеристик судна. В этих условиях оказывается оправданной вариантная оптимизация, подразумевающая фиксацию большинства основных параметров судна вблизи их оптимальных значений и детальное рассмотрение интересующих заказчика локальных опций. Например, типа пропульсивной установки, ледового класса, альтернативных решений в области энергоэффективности и т.п. Также стоит отметить, что на практике вариантная оптимизация, как правило, приобретает аспектно-ориентированный характер, то есть подразумевает детальное рассмотрение только одного или нескольких качеств судна.

Особое распространение системотехнический подход получает при проектировании либо нетипичных, либо относительно немногочисленных судов, таких как транспортные суда ледового плавания [41], суда смешанного река-море плавания [34], суда обеспечения буровых платформ [42, 43], суда для обслуживания морских ветрогенераторов [44], добычные суда [45]. Возможности оптимизации таких судов наиболее широки, чего нельзя сказать о традиционных и массовых транспортных судах, таких как нефтеналивные суда, балкеры, газовозы СПГ, контейнеровозы и некоторые другие.

С точки зрения прикладного проектирования на системотехническом этапе происходят существенные изменения, обусловленные новыми возможностями компьютерных технологий. Например, при конфигурировании судна и оптимизации общего расположения применяется метод, основанный на функциональных блоках (design building block approach) [46], при котором основные судовые помещения и отсеки представляются в виде отдельных программных сущностей. На методическом уровне звучит критика традиционных методов последовательных приближений на основе «спирали проектирования», высказываются идеи по их замещению методами прямого расчета [47]. Принципы цель-ориентированного подхода используются при анализе аварийной остойчивости [48, 49], параметрическом проектировании конструкций [50], оптимизации обводов корпуса и решении других прикладных задач. В области нормативного регулирования наблюдается тенденция отхода от проектирования, основанного на предписывающих детерминированных правилах, и замещение их оптимизацией судна под конкретные задачи эксплуатации [51], что призвано расширить пространство для поиска инновационных решений, однако значительно повышает требования к квалификации проектанта.

Выполнение практических расчетов становится практически невозможным без применения специализированных программных решений, которые охватывают множество областей, таких как расчет размеров конструкций, определение посадки и остойчивости, оценка сопротивления, проектирование гребных винтов и др. Соответствующие решения могут быть интегрированными в судостроительные САПР,

а могут существовать в виде отдельных приложений с собственным программным интерфейсом, что позволяет использовать их при создании проектных моделей.

Характерным примером в области прикладной реализации системотехнических принципов является проект HoliShip [52], который был нацелен на создание и практическую реализацию нового целостного подхода к проектированию (holistic approach) и разрабатывался при участии 40 крупных компаний-производителей программных решений для судостроения. Методическая суть этого подхода заключается в отказе от использования традиционной спирали проектирования (на каждом витке которой отсеивается множество возможных вариантов и оставляется только один), параллельном выполнении проектных расчетов с генерацией сотен возможных вариантов судна и последующем анализе и выборе лучшего. Практика проектирования судна на основе этого подхода подразумевает интеграцию в единый вычислительный процесс целого ряда уже существующих решений, таких как CAESSES (параметрическое моделирование), NAPA (общее проектирование), Poseidon (проектирование конструкций), ShipFlow (численная гидродинамика) и др.

4. СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В табл. 1 кратко обобщены описанные выше подходы к проектированию судна и указаны их основные особенности. При рассмотрении этой таблицы следует учитывать несколько деталей.

Таблица 1

Описание принципиальных подходов к проектированию судов на ранних стадиях

Подход	Формулировка задачи проектирования	Основные технологии проектного анализа
Аналитический (до 1960-х)	Найти такие значения параметров судна, чтобы его интегральные характеристики соответствовали требованиям технического задания и удовлетворяли различным общесудовым ограничениям (остойчивость, непотопляемость, технологичность и др.)	- последовательные приближения; - спираль проектирования; - пересчет с известного прототипа; - перестроение теоретического чертежа; - аналитические уравнения нагрузок масс, вместимости, остойчивости и др.; - чертежно-графическое представление судна
Оптимизационный (1970 — 1990)	Найти наилучшие параметры судна с точки зрения критерия оптимизационной задачи, которая может охватывать судно в целом (общее расположение, главные размерения, коэффициенты полноты и др.), его отдельные составляющие (конструкция корпуса, гребной винт, форма обводов и т.п.) или же всю МТС, в составе которой это судно работает (поиск оптимальной скорости и грузоемкости)	- внутренняя и внешняя задачи проектирования; - моделирование работы флота на линиях перевозок; - регрессионные модели в прикладных судостроительных расчетах; - специализированные аналитические параметрические модели корпуса судна; - оптимизация характеристик судна и МТС в аналитическом пространстве (математическое программирование, дискретная комбинаторная оптимизация); - функциональное программирование
Системотехнический (1990 — н.в.)	Определить наилучшие характеристики судна, выходя за узкие рамки конкретной постановки оптимизационной задачи и рассматривая судно как сложную техническую систему во всем множестве ее возможных проявлений и в контексте функциональной роли судна во внешней среде, которая, в свою очередь, объединяет все внешние по отношению к судну системы технического, экономического и природного характера.	- вариантная оптимизация; - компьютерные технологии во всех аспектах проектирования судна; - акцент на отдельных аспектах судна и МТС (цель-, риск- и миссия-ориентированный подходы); - концепция прямого расчета, численные методы; - параметрическое описание корпуса на основе универсальных NURBS-моделей; - объектно-ориентированный подход в общей компоновке судна; - детализированные процессные модели работы судна во внешней среде (дискретно-событийные и агентные имитационные модели)

Во-первых, в области проектирования (как и в любой другой технической сфере) со временем происходит не только разработка новых технологий, но и потеря старых. Действительно, быстрые изменения компьютерной техники и совершенствование программного обеспечения, смена поколений исследователей и стремление молодых проектантов следовать за новыми трендами — все это приводит к тому, что восстановление старых технологий в их первоначальном виде становится практически невозможным, несмотря на наличие книг, статей и технических отчетов. В частности, по этой причине в настоящее время в

отечественной практике практически не используются подходы некогда мощной школы оптимизационного проектирования и согласованной оптимизации судовых подсистем, основные положения которой представлены в работах [10, 13, 14] и ряде других.

Во-вторых, несмотря на указанные в табл. 1 временные рамки и характерные технологии, каждый из подходов продолжает использоваться и эволюционировать. Например, практически ни одна современная проектная модель не обходится без расчетных методик аналитического типа для оценки составляющих нагрузки масс [53], а технологии пересчета с прототипа по-прежнему применяются в расчетах сопротивления воды движению судна [16]. Оптимизационные подходы широко распространены в проектировании геометрии обводов и движителей. Также существует целый класс методов для итеративной оптимизации общего расположения судна [54] с применением целочисленного программирования и имитационного моделирования движения персонала и пассажиров. Отдельной большой областью применения системотехнического подхода является создание новых энергоэффективных судов [24].

5. ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

Изложенная логика совместного развития компьютерных технологий и методов проектного анализа позволяет предположить наиболее вероятные пути дальнейшего развития теории и практики раннего проектирования судов.

По нашему мнению, следующим знаковым технологическим этапом, безусловно, станет проектирование с использованием генеративного искусственного интеллекта (ИИ) (*generative artificial intelligence*) и больших языковых моделей (*large language model*) — технологий, которые сейчас переживают этап взрывного роста [55]. Подобные модели могут применяться в роли ассистента специалиста-проектанта, который имеет не только искусственное эвристическое мышление, но и большие вычислительные возможности благодаря подключению к расчетным модулям проектной модели судна. Подобно тому, как появление ООП сделало возможным практическую реализацию теоретических принципов системотехнического подхода, так и появление прикладного ИИ должно открыть новые возможности в области всестороннего проектного анализа в условиях все возрастающего количества подлежащих учету факторов, процессов и данных.

Однако в настоящее время ИИ-модели используются главным образом как алгоритмы для проектирования и оптимизации отдельных аспектов, например формы корпуса судна с точки зрения сопротивления на чистой воде [56, 57]. Поэтому, несмотря на возможную революционность этого направления и потенциал кардинального изменения взаимодействия человека-проектанта с компьютером [58], текущий уровень развития не позволяет делать какие-либо уверенные выводы или обобщения об облике такого «ИИ-проектанта» в инженерных областях. Кроме того, в настоящее время имеются некоторые системные проблемы ИИ-моделей, например склонность к «галлюцинированию», которая может не только вводить в заблуждение, но и создавать риски для отслеживания строгого и однозначного соответствия проекта различным правилам и нормам. Тем не менее можно уверенно говорить о том, что работы по созданию инженерных ИИ-ассистентов активно ведутся [59]. Вероятно, подобные решения сначала появятся в более массовых технических областях [60], а затем и в судостроении.

Важным этапом на пути дальнейшего внедрения ИИ в практику общего проектирования является создание цифрового двойника (или цифровой модели) проекта судна [61] — сущности, которая позволяет ИИ-системе однозначно и с высокой степенью точности отслеживать влияние изменений характеристик судна на его многочисленные проектные показатели. Дело в том, что для функционирования ИИ необходима цифровая виртуальная среда, моделирующая реальность. Цифровой двойник (ЦД) призван стать таким своеобразным виртуальным макетом проекта, допускающим произвольные изменения различных характеристик и отображающим результирующие показатели по известному принципу «что будет, если...?» [62]. Помимо потенциала дальнейшей интеграции с ИИ-моделями, на первоначальных этапах реализации ЦД управление им может быть ориентировано на человека-пользователя, что также имеет существенную практическую ценность и представляет собой отдельную методическую задачу. Обсуждению проблематики создания подобных прикладных моделей планируется посвятить отдельную статью.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе концептуального проектирования отечественные судостроители привыкли двигаться в пространстве проектных решений преимущественно «на ощупь», ориентируясь на собственный опыт, доступные прототипы, качественные закономерности и используя для получения количественных оценок приблизительные соотношения или простые аналитические модели. Вследствие высокой трудоемкости САПР-ориентированных проектных проработок, подробное рассмотрение на концептуальной стадии стало возможным буквально для одного-двух выбранных вариантов судна. Если добавить к этому характерную для России относительно невысокую интенсивность проектирования крупных гражданских судов, то можно получить картину потери интереса индустрии к концептуальному проектированию и вытекающее отсюда стремление проектантов копировать зарубежные решения. В результате отечественная школа исследовательского проектирования гражданских судов впала в своеобразную автаркию, свелась к господству качественных экспертно-аналитических методов, преподаванию классических подходов и решению учебно-квалификационных задач. Выходом из этой ситуации, на наш взгляд, может стать акцент на создании прикладных проектных решений, направленных на поддержку прикладного исследовательского и концептуального проектирования судна, описанию которых посвящен раздел 3 настоящей работы. Однако следует признать, что движение по этому пути затруднено по нескольким причинам.

Препятствием организационно-экономического характера является то, что из-за относительно низкой стоимости ранних стадий проектирования [63] экономическим агентам (в первую очередь конструкторским бюро) становится невыгодно, а иногда и невозможно уделять таким проработкам значительное внимание. По объективным причинам наибольший интерес для конструкторских бюро представляют этапы детального проектирования, которые позволяют загрузить работой и обеспечить заработной платой достаточно большой коллектив специалистов.

Другой сдерживающий фактор имеет исторические корни. Дело в том, что отечественные проектанты привыкли создавать судно, не выходя за пределы требований технического задания, то есть следуя идее разделения судна и внешней среды, на основе которой еще в 1940 — 1960-х гг. строилась методология аналитического подхода. Проектант всегда интуитивно стремится узнать, какое судно нужно заказчику, и по возможности избежать сложной и требующей специальных компетенций работы над формированием рациональных требований к судну. Исторические причины этого хорошо иллюстрирует пример из советских времен, когда существовало два отдельных ведомства: Министерство морского флота (Минморфлот) и Министерство судостроительной промышленности (Минсудпром). Первое отвечало за формирование технических требований к судну (т.е. требований ТЗ) и его технико-экономическое обоснование, а второе — за реализацию данного судна согласно утвержденным требованиям. В текущих условиях такой подход оказывается нереализуем, поскольку системообразующие государственные структуры, функционально подобные Минморфлоту, отсутствуют. Заказчик же в большинстве случаев не может заниматься всесторонним поиском наилучшего решения, предпочитая ориентироваться на существующие проекты или мнения отдельных экспертов.

Существуют и трудности технического характера, такие как высокая сложность реализации проектных моделей из-за их многовариантности и насыщенности прикладными алгоритмами. При этом следует признать, что дополнительным фактором, сдерживающим выполнение соответствующих проектно-программных проработок, является ограниченность знаний отечественных проектантов в области компьютерных технологий. В особенности это характерно для сферы прикладного искусственного интеллекта [64].

Отмеченные негативные тенденции могут быть преодолены при наличии соответствующей отраслевой политики целенаправленного развития технологий проектного анализа. Выполненный выше обзор позволяет заключить, что дальнейшее развитие теории проектирования судов фактически невозможно без применения информационных и программных технологий, а также специализированных судостроительных программных решений. Другими словами, без тесной интеграции с ИТ-индустрией создание современных прикладных инструментов проектного анализа оказывается практически невозможным, а значит, невозможно и развитие теории проектирования, которая всегда имела прикладной характер и в значительной степени не столько создавала новые технологии, сколько использовала существующие.

В качестве наиболее интересных примеров для дальнейшего изучения, которые содержат множество методических и технических идей, можно рекомендовать проект HoliShip [52] и систему NAPA. Проект HoliShip, о котором имеется множество открытых публикаций, наиболее интересен в методическом смысле, а система NAPA представляет, на наш взгляд, главным образом технический интерес, поскольку содержит не только блоки концептуального проектирования судов, но и модели оперативного управления и оптимизации работы флота.

Дальнейшее развитие технологий цифрового дублирования и цифровых двойников проектируемого судна может стать одним из дополнительных направлений развития проектного анализа судов. В этой области имеется целый комплекс как теоретических, так и прикладных вопросов, однако эта тема заслуживает отдельного рассмотрения в дальнейшем.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своим коллегам из ООО «Бюро Гиперборей» за ценные комментарии и рекомендации по тексту настоящей работы. Особую благодарность выражаем Александру Алексеевичу Кондратенко, научному сотруднику Технического университета Софии (Болгария), за компетентные замечания и полезные ссылки по вопросам современного развития теории проектирования судов, а также Александру Сергеевичу Буянову, заместителю генерального директора АО «ЦНИИМФ», за описание опыта межведомственной кооперации при проектировании судов в советский период.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00039 «Теоретические основы и прикладные инструменты для создания системы интеллектуального планирования работы флота и поддержки принятия решений в арктическом судоходстве», <https://rscf.ru/project/23-19-00039/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашин В.М. Еще раз о роли и задачах теории проектирования судов / В.М. Пашин // Судостроение. — 2012. — № 2. — С. 9 — 12.
2. Петров А.С. К 2027 году у судостроителей должна появиться российская САПР / А.С. Петров // Корабел.ру. — 2023. — № 3. — С. 112 — 121.
3. Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем / А.И. Гайкович. — СПб.: НИЦ «МОРИНТЕХ», 2001. — 432 с.
4. Ашик В.В. Проектирование судов / В.В. Ашик. — Л.: Судостроение, 1985. — 320 с.
5. Evans J.H. Basic design concepts / J.H. Evans // Journal of the American Society of Naval Engineers. — 1959. — Vol. 71, Issue 4. — P. 671 — 678. — DOI 10.1111/j.1559-3584.1959.tb01836.x.
6. Краев В.И. Экономические обоснования при проектировании морских грузовых судов / В.И. Краев, О.К. Ступин, Э.Л. Лимонов. — Л.: Судостроение, 1973. — 296 с.
7. Ногид Л.М. Теория проектирования судов / Л.М. Ногид. — Л.: Судпромгиз, 1955. — 480 с.
8. Schneekluth H. Ship design for efficiency and economy. 2nd ed. / H. Schneekluth, V. Bertram. — Oxford; Boston: Butterworth-Heinemann, 1998. — 240 p.
9. Watson D.G.M. Practical ship design. Vol. 1 / D.G.M. Watson. — Amsterdam; New York: Elsevier, 1998. — 566 p.
10. Пашин В.М. Оптимизация судов / В.М. Пашин. — Л.: Судостроение, 1983. — 296 с.
11. Everett J.L. Optimization of a fleet of large tankers and bulkers: A linear programming approach / J.L. Everett, A.C. Hax, V.A. Lewinson, D. Nudds // Marine Technology SNAME. — 1972. — No. 9. — P. 430 — 438. — DOI 10.5957/mtl.1972.9.4.430.
12. Краев В.И. Экономические обоснования при проектировании морских судов / В.И. Краев. — Л.: Судостроение, 1981. — 280 с.
13. Соколов В.П. Постановка задач экономического обоснования судов / В.П. Соколов. — Л.: Судостроение, 1987. — 164 с.
14. Гайкович А.И. Применение современных математических методов в проектировании судов: уч. пос. / А.И. Гайкович. — Л.: Изд-во ЛКИ, 1982. — 89 с.
15. Christiansen M. Chapter 4. Maritime transportation / M. Christiansen, K. Fagerholt, B. Nygreen, D. Ronen // Handbooks in Operations Research and Management Science / C. Barnhart, G. Laporte (eds.). — Elsevier, 2007. — Vol. 14. — P. 189 — 284. — DOI 10.1016/S0927-0507(06)14004-9.
16. Справочник по теории корабля: в 3 т. / под ред. Я.И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — 764 с.
17. Holtrop J. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data / J. Holtrop // International Shipbuilding Progress. — 1984. — Vol. 31. — P. 272 — 276.
18. Цой Л.Г. Формула для определения ледопроеходимости и рекомендации по выбору формы обводов корпуса ледоколов и транспортных судов ледового плавания / Л.Г. Цой // Перспективные типы морских транспортных судов, их мореходные и ледовые качества: сб. науч. тр. ЦНИИМФ. — М.: Транспорт, 1990. — С. 141 — 144.
19. Богданов А.А. Современные методы построения и согласования теоретического чертежа корпуса судна с помощью ЭВМ / А.А. Богданов // Судостроение за рубежом. — 1972. — № 8. — С. 18 — 31.
20. Lackenby H. On the systematic geometrical variation of ship forms / H. Lackenby // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. — 1950. — Vol. 92. — P. 289 — 315.
21. Ковалев В.А. Новые методы автоматизации проектирования судовой поверхности / В.А. Ковалев. — Л.: Судостроение, 1982. — 212 с.
22. Piegls L. The NURBS Book. 2nd ed. / L. Piegls, W. Tiller. — New York: Springer-Verlag, 1997. — 646 p. — DOI 10.1007/978-3-642-59223-2.
23. Percival S. Hydrodynamic optimization of ship hull forms / S. Percival, D. Hendrix, F. Noblesse // Applied Ocean Research. — 2001. — Vol. 23, No. 6. — P. 337 — 355. — DOI 10.1016/S0141-1187(02)00002-0.
24. Kondratenko A.A. Existing technologies and scientific advancements to decarbonize shipping by retrofitting / A.A. Kondratenko, M. Zhang, S. Tavakoli, E. Altarriba et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2025. — Vol. 121. — P. 115430. — DOI 10.1016/j.rser.2025.115430.
25. Вайсфельд М. Объектно-ориентированное мышление / М. Вайсфельд. — СПб.: Питер, 2014. — 304 с.

26. Вashedченко А.Н. Автоматизированное проектирование судов: уч. пос. / А.Н. Вashedченко. — Л.: Судостроение, 1985. — 164 с.
27. Gaspar H.M. Handling complexity aspects in conceptual ship design / H.M. Gaspar, A.M. Ross, D.H. Rhodes, S.O. Erikstad // Proceedings of the 11th International Maritime Design Conference (IMDC-2012). Glasgow, UK, June 2012. — 14 p.
28. Andrews D.A. A comprehensive methodology for the design of ships (and other complex systems) / D.A. Andrews // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 1998. — Vol. 454, No. 1998. — P. 187 — 211. — DOI 10.1098/rspa.1998.0154.
29. Пашин В.М. Роль науки в организации и становлении российского судостроения на современном этапе / В.М. Пашин // Судостроение. — 2007. — № 6 (775). — С. 3 — 6.
30. Papanikolaou A. Ship design in the era of digital transition / A. Papanikolaou, S. Harries, E. Boulougouris, S.O. Erikstad et al. // International Marine Design Conference (IMDC-2024). Amsterdam, Netherlands. June 2024. — 40 p. — DOI 10.59490/imdc.2024.784.
31. Волков В.В. Концепция объектно-ориентированного подхода к автоматизации исследовательского проектирования / В.В. Волков, С.А. Мешков, А.Т. Норов // Программные продукты и системы. — 1996. — № 1. — С. 19 — 23.
32. Kujala P. Goal-based ship design towards safe and sustainable shipping in ice-covered waters / P. Kujala, M. Bergström, S. Hirdaris // Transportation Research Procedia. — 2023. — Vol. 72. — P. 3956 — 3963. — DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.484.
33. Risk-based ship design: Methods, tools and applications / A. Papanikolaou (ed.). — Springer, 2009. — 379 p. — DOI 10.1007/978-3-540-89042-3.
34. Егоров Г.В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска / Г.В. Егоров. — СПб.: Судостроение, 2007. — 384 с.
35. Choi M. Mission based ship design under uncertain Arctic Sea ice conditions / M. Choi, S.O. Erikstad, S. Ehlers // Proceedings of the 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE-2015). St. John's, Newfoundland, Canada. May 31 — June 5, 2015. — DOI 10.1115/OMAE2015-41743.
36. Brett P.O. A methodology for logistics-based ship design / P.O. Brett, E. Boulougouris, R. Horgen, D. Konovessis et al. // Proceedings of 9th International Marine Design Conference (IMDC-2006). Ann Arbor, Michigan, USA, 16 — 19 May 2006.
37. Gkochari C.C. Optimization of ship design within an integrated multimodal transport system / C.C. Gkochari, A. Papanikolaou // Journal of Ship Production and Design. — 2010. — Vol. 26, No. 1. — P. 47 — 59. — DOI 10.5957/jspd.2010.26.1.47.
38. Таровик О.В. Моделирование систем арктического морского транспорта: основы междисциплинарного подхода и опыт практических работ / О.В. Таровик, А.Г. Топаж, А.Б. Крестьянцев, А.А. Кондратенко // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 1 (25). — С. 86 — 101.
39. Таровик О.В. Комплексная имитационная модель морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» / О.В. Таровик, А.Г. Топаж, А.Б. Крестьянцев, А.А. Кондратенко и др. // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (27). — С. 86 — 103.
40. Буянов А.С. Моделирование системы транспортно-логистического обеспечения месторождений Обской и Тазовской губ. / А.С. Буянов, О.В. Таровик, А.Б. Крестьянцев, А.Г. Топаж и др. // Деловой журнал NEFTEGAZ.RU. — 2022. — № 2 (122). — С. 70 — 78.
41. Bergström M. Assessment of the applicability of goal- and risk-based design on Arctic sea transport systems / M. Bergström, S.O. Erikstad, S. Ehlers // Ocean Engineering. — 2016. — Vol. 128. — P. 183 — 198. — DOI 10.1016/j.oceaneng.2016.10.040.
42. Erikstad S.O. System based design of offshore support vessels / S.O. Erikstad, K. Levander // Proceedings of the 11th International Marine Design Conference (IMDC-2012). Glasgow, UK, June 2012. — 14 p.
43. Кондратенко А.А., Таровик О.В. Проектирование арктических судов снабжения с учетом структуры грузопотока транспортной системы / А.А. Кондратенко, О.В. Таровик // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 2 (34). — С. 80 — 96. — DOI 10.25283/2223-4594-2019-2-80-96.
44. Nykiel D. A sustainability-driven approach to early-stage offshore vessel design: A case study on wind farm installation vessels / D. Nykiel, A. Zmuda, T. Abramowski // Sustainability. — 2025. — Vol. 17, Issue 6. — P. 2752. — DOI 10.3390/su17062752.
45. Solheim A.V. System-based ship design of a deep-sea mining vessel / A.V. Solheim, B.R. Groven, J.M. Røsbjerg, A. Wigdahl et al. // Ship Technology Research. — 2024. — 15 p. — DOI 10.1080/09377255.2024.2396197.
46. Bole M. Early stage integrated parametric ship design / M. Bole, C. Forrest // Proceedings of 2nd International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS). — 2005. — P. 447 — 460.
47. Pawling R.G. A study into the validity of the ship design spiral in early stage ship design / R.G. Pawling, V. Percival, D.J. Andrews // Journal of Ship Production and Design. — 2017. — Vol. 33, Issue 2. — P. 81 — 100. — DOI 10.5957/JSPD.33.2.160008.
48. Tsakalakis N. Goal-based ship subdivision and layout / N. Tsakalakis, D. Vassalos, R. Pusa // Proceedings of the 10th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB-2009). St. Petersburg, June 2009. — P. 687 — 696.
49. Papanikolaou A. GOALDS — Goal Based Damage Ship Stability and Safety Standards / A. Papanikolaou, R. Hamann, B.S. Lee, C. Mains et al. // Accident Analysis and Prevention. — 2013. — Vol. 60. — P. 353 — 365. — DOI 10.1016/j.aap.2013.04.006.
50. Peschmann J. IACS common structural rules as an element of IMO goal based standards for bulk carriers and oil tankers / J. Peschmann, H. Selle, J.R. Jankowski, G.E. Horn et al. // Progress in the Analysis and Design of Marine Structures. — London: CRC Press, 2017. — DOI 10.1201/9781315157368-39.
51. Resolution MSC.287(87) — Adoption of the international goal-based ship construction standards for bulk carriers and oil tankers / IMO. 2010. [Электронный ресурс] URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.287\(87\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.287(87).pdf) (дата обращения 29.05.2025).
52. Papanikolaou A.D. Holistic Approach to Ship Design / A.D. Papanikolaou // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10, Issue 11. — P. 1717. — DOI 10.3390/jmse10111717.
53. Papanikolaou A. Ship Design. Methodologies of Preliminary Design / A. Papanikolaou. — Springer Verlag, 2014. — 628 p. — DOI 10.1007/978-94-017-8751-2.
54. Wang Z. Interactive ship cabin layout optimization / Z. Wang, X.Q. Yang, Yu.H. Zheng, W.C. Chen et al. // Ocean Engineering. — 2023. — Vol. 270. — P. 113647. — DOI 10.1016/j.oceaneng.2023.113647.
55. Latent space [Электронный ресурс] URL: <https://www.latent.space/p/2025-papers> (дата обращения 14.02.2025).
56. Khan S. ShipHullGAN: a generic parametric modeller for ship hull design using deep convolutional generative model / S. Khan, K. Goucher-Lambert, K. Kostas, P. Kaklis // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 2023. — Vol. 411. — P. 116051. — DOI 10.1016/j.cma.2023.116051.
57. Ao Y. Artificial Intelligence design for ship structures: A variant multiple-input neural network-based ship resistance prediction / Y. Ao, Y. Li, J. Gong, S. Li // ASME. Journal of Mechanical Design. — September 2022. — Vol. 144, Issue 9. — P. 091707. — DOI 10.1115/1.4053816.
58. Furtado L.S. A task-oriented framework for generative AI in design / L.S. Furtado, J.B. Soares, V. Furtado // Journal of Creativity. — 2024. — Vol. 34, Issue 2. — DOI 10.1016/j.joc.2024.100086.

59. Onatayo D. Generative AI applications in architecture, engineering, and construction: Trends, implications for practice, education & imperatives for upskilling — A review / D. Onatayo, A. Onososen, A.O. Oyediran, H. Oyediran et al. // *Architecture*. — 2024. — Vol. 4, Issue 4. — P. 877 — 902. — DOI 10.3390/architecture4040046.
60. Requejo W.S. Fostering creativity in engineering design through constructive dialogues with generative artificial intelligence / W.S. Requejo, F.F. Martínez, C.A. Vega, R.Z. Martínez et al. // *Cell Reports Physical Science*. — 2024. — Vol. 5, Issue 9. — DOI 10.1016/j.xcrp.2024.102157.
61. Kana A.A. Application of digital twins in the design of new green transport vessels / A.A. Kana, W. Li, I. van Noesel, Y. Pang et al. // *State-of-the-Art Digital Twin Applications for Shipping Sector Decarbonization* / B. Karakostas, T. Katsoulakos (eds.). IGI Global Scientific Publishing, 2024. P. 161 — 191 / — DOI 10.4018/978-1-6684-9848-4.ch008.
62. Mauro F. Digital twin for ship life-cycle: A critical systematic review / F. Mauro, A.A. Kana // *Ocean Engineering*. — 2023. — Vol. 269. — P. 113479. — DOI 10.1016/j.oceaneng.2022.113479.
63. Michalski J.P. Parametric method of preliminary prediction of the ship building costs / J.P. Michalski // *Polish Maritime Research*. — 2004. — Special issue. — P. 16 — 19.
64. Гайкович А.И. Проблемы теории проектирования судов и ее преподавания / А.И. Гайкович // *Труды Крыловского государственного научного центра*. — 2020. — Спец. вып. 1. — С. 137 — 141. — DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-S-137-141.

REFERENCES

1. Pashin V.M. Eshche raz o roli i zadachakh teorii proektirovaniya sudov [Once again on the role and objectives of ship design theory]. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2012. No. 2. P. 9 — 12.
2. Petrov A.S. K 2027 godu u sudostroitelei dolzhna poyavit'sya rossiiskaya SAPR [Shipbuilders should have a Russian CAD system by 2027]. *Korabel.ru*. 2023. No. 3. P. 112 — 121.
3. Gaikovich A.I. Osnovy teorii proektirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Fundamentals of the theory of design of complex technical systems]. St. Petersburg: NITs "Morintex", 2001. 432 p.
4. Ashik V.V. Proektirovanie sudov [Ship design]. Leningrad: Sudostroenie, 1985. 320 p.
5. Evans J.H. Basic design concepts. *Journal of the American Society of Naval Engineers*. 1959. Vol. 71, Issue 4. P. 671 — 678. DOI 10.1111/j.1559-3584.1959.tb01836.x.
6. Kraev V.I., Stupin O.K., Limonov E.L. Ekonomicheskie obosnovaniya pri proektirovanii morskikh gruzovykh sudov [Economic evaluation in the design of seagoing cargo ships]. Leningrad: Sudostroenie, 1973. 296 p.
7. Nogid L.M. Teoriya proektirovaniya sudov [Ship design theory]. Leningrad: Sudpromgiz, 1955. 480 p.
8. Schneekloth H., Bertram V. Ship design for efficiency and economy. 2nd ed. Oxford; Boston: Butterworth-Heinemann, 1998. 240 p.
9. Watson D.G.M. Practical ship design. Vol. 1. Amsterdam; New York: Elsevier, 1998. 566 p.
10. Pashin V.M. Ship optimization. Leningrad: Sudostroenie, 1983. 296 p.
11. Everett J.L., Hax A.C., Lewinson V.A., Nudds D. Optimization of a fleet of large tankers and bulkers: A linear programming approach. *Marine Technology SNAME*. 1972. No. 9. P. 430 — 438. DOI 10.5957/mtl.1972.9.430.
12. Kraev V.I. Ekonomicheskie obosnovaniya pri proektirovanii morskikh sudov [Economic evaluation in the design of sea-going ships]. Leningrad: Sudostroenie, 1981. 280 p.
13. Sokolov V.P. Postanovka zadach ekonomicheskogo obosnovaniya sudov [Objective-setting in economic evaluation of ships]. Leningrad: Sudostroenie, 1987. 164 p.
14. Gaikovich A.I. Primenenie sovremennykh matematicheskikh metodov v proektirovanii sudov [Application of modern mathematical methods in ship design: a study guide]. Leningrad: LKI, 1982. 89 p.
15. Christiansen M., Fagerholt K., Nygreen B., Ronen D. Chapter 4. Maritime transportation. *Handbooks in Operations Research and Management Science* / C. Barnhart, G. Laporte (eds.). Elsevier, 2007. Vol. 14. P. 189 — 284. DOI 10.1016/S0927-0507(06)14004-9.
16. Spravochnik po teorii korablya: v 3 t. / pod red. Ya.I. Voikunskogo [Handbook in ship theory: in 3 vols. / Ya.I. Voikunskii (ed.)]. Leningrad: Sudostroenie, 1985. 764 p.
17. Holtrop J. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. *International shipbuilding progress*. 1984. Vol. 31. P. 272 — 276.
18. Tsoi L.G. Formula dlya opredeleniya ledoprokhodimosti i rekomendatsii po vyboru formy obvodov korpusa ledokolov i transportnykh sudov ledovogo plavaniya [Formula for determining ice-breaking capability and recommendations for selecting the hull shape of icebreakers and ice transport vessels]. *Perspektivnye tipy morskikh transportnykh sudov, ikh morekhodnye i ledovye kachestva [Prospective types of marine transport ships, their seaworthiness and ice performance: Transactions of the Central Research and Design Institute of the Marine Fleet]*. Moscow: Transport, 1990. P. 141 — 144.
19. Bogdanov A.A. Sovremennye metody postroeniya i soglasovaniya teoreticheskogo chertezha korpusa sudna s pomoshch'yu EVM [Modern methods of setting off and fairing the lines drawing of a ship with the help of computers]. *Sudostroenie za rubezhom [Foreign shipbuilding]*. 1972. No. 8. P. 18 — 31.
20. Lackenby H. On the systematic geometrical variation of ship forms. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*. 1950. Vol. 92. P. 289 — 315.
21. Kovalev V.A. Novye metody avtomatizatsii proektirovaniya sudovoi poverkhnosti [New methods of automation of ship surface design]. Leningrad: Sudostroenie, 1982. 212 p.
22. Piegls L., Tiller W. The NURBS Book. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1997. 646 p. DOI 10.1007/978-3-642-59223-2.
23. Percival S., Hendrix D., Noblesse F. Hydrodynamic optimization of ship hull forms *Applied Ocean Research*. 2001. Vol. 23, No. 6. P. 337 — 355. DOI 10.1016/S0141-1187(02)00002-0.
24. Kondratenko A.A., Zhang M., Tavakoli S., Altarriba E. et al. Existing technologies and scientific advancements to decarbonize shipping by retrofitting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 212. P. 115430. DOI 10.1016/j.rser.2025.115430.
25. Weisfeld M. Ob"ektno-orientirovannoe myshlenie [Object-oriented thinking]. St. Petersburg: Piter, 2014. 304 p.
26. Vashedchenko A.N. Avtomatizirovannoe proektirovanie sudov [Computer-aided ship design: a study guide]. Leningrad: Sudostroenie, 1985. 164 p.
27. Gaspar H.M., Ross A.M., Rhodes D.H., Erikstad S.O. Handling complexity aspects in conceptual ship design. *Proceedings of the 11th International Maritime Design Conference (IMDC-2012)*. Glasgow, UK, June 2012. 14 p.

28. Andrews D.A. A comprehensive methodology for the design of ships (and other complex systems). *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1998. Vol. 454, No. 1998. P. 187 — 211. DOI 10.1098/rspa.1998.0154.
29. Pashin V.M. Rol' nauki v organizatsii i stanovlenii rossiiskogo sudostroeniya na sovremennom etape [Role of science in organization and formation of Russian shipbuilding at the present stage]. *Sudostroenie*. 2007. No. 6 (775). P. 3 — 6.
30. Papanikolaou A., Harries S., Boulougouris E., Erikstad S.O. et al. Ship design in the era of digital transition. *International Marine Design Conference (IMDC-2024)*. Amsterdam, Netherlands. June 2024. 40 p. DOI 10.59490/imdc.2024.784.
31. Volkov V.V., Meshkov S.A., Norov A.T. Kontseptsiya ob'ektno-orientirovannogo podkhoda k avtomatizatsii issledovatel'skogo proektirovaniya [The concept of object-oriented approach to automating researching design]. *Programmye produkty i sistemy [Software products and systems]*. 1996. No. 1.
32. Kujala P., Bergström M., Hirdaris S. Goal-based ship design towards safe and sustainable shipping in ice-covered waters. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 3956 — 3963. DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.484.
33. Risk-based ship design. Methods, tools and applications / A. Papanikolaou (ed.). Springer, 2009. 379 p. DOI 10.1007/978-3-540-89042-3.
34. Egorov G.V. Proektirovanie sudov ogranichennykh raionov plavaniya na osnovanii teorii riska [Design of restricted area ships based on risk theory]. St. Petersburg: Sudostroenie, 2007. 384 p.
35. Choi M., Erikstad S.O., Ehlers S. Mission based ship design under uncertain Arctic Sea ice conditions. *Proceedings of the 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE-2015)*. St. John's, Newfoundland, Canada. May 31 — June 5, 2015. DOI 10.1115/OMAE2015-41743.
36. Brett P.O., Boulougouris E., Horgen R., Konovessis D. et al. A methodology for logistics-based ship design. *Proceedings of 9th International Marine Design Conference (IMDC-2006)*. Ann Arbor, Michigan, USA, 16 — 19 May 2006.
37. Gkochari C.C., Papanikolaou A. Optimization of ship design within an integrated multimodal transport system. *Journal of Ship Production and Design*. 2010. Vol. 26, No. 1. P. 47 — 59. DOI 10.5957/jspd.2010.26.1.47.
38. Tarovik O.V., Topaj A.G., Krestyantsev A.B., Kondratenko A.A. Arctic marine transport system simulation: Multidisciplinary approach fundamentals and practical experience. *Arktika: Ekologia i Ekonomika [Arctic: Ecology and Economy]*. 2017. No. 1 (25). P. 86 — 101. (In Russ.)
39. Tarovik O.V., Topaj A.G., Krestyantsev A.B., Kondratenko A.A. et al. Kompleksnaya imitatsionnaya model' morskoi transportno-tekhnologicheskoi sistemy platformy «Prirazlomnaya» [Integrated simulation model of the offshore transportation and technological system of the Prirazlomnaya platform]. *Arktika: Ekologia i Ekonomika [Arctic: Ecology and Economy]*. 2017. No. 3. P. 86 — 103.
40. Buyanov A.S., Tarovik O.V., Krest'yantsev A.B., Topazh A.G. et al. Modelirovanie sistemy transportno-logisticheskogo obespecheniya mestorozhdenii Obskoi i Tazovskoi gub [Modeling of the system of transport and logistics support for the Ob and Taz Bay fields]. *NEFTEGAZ.RU*. 2022. No. 2 (122). P. 70 — 78.
41. Bergström, M., Erikstad, S.O., Ehlers, S. Assessment of the applicability of goal- and risk-based design on Arctic sea transport systems. *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 128. P. 183 — 198. DOI 10.1016/j.oceaneng.2016.10.040.
42. Erikstad S.O., Levander K. System based design of offshore support vessels. *Proceedings of the 11th International Marine Design Conference (IMDC-2012)*. Glasgow, UK, June 2012. 14 p.
43. Kondratenko A.A., Tarovik O.V. Proektirovanie arkticheskikh sudov snabzheniya s uchetom struktury gruzopotoka transportnoi sistemy [Design of Arctic supply vessels with respect to the cargo flow structure of the transportation system]. *Arktika: Ekologia i Ekonomika [Arctic: Ecology and Economy]*. 2019. No. 2 (34). P. 80 — 96. DOI 10.25283/2223-4594-2019-2-80-96.
44. Nykiel D., Zmuda D., Abramowski T. A sustainability-driven approach to early-stage offshore vessel design: A case study on wind farm installation vessels. *Sustainability*. Vol. 17, Issue 6. P. 2752. DOI 10.3390/su17062752.
45. Solheim A.V., Groven B.R., Røsbjergen J.M., Wigdahl A. et al. System-based ship design of a deep-sea mining vessel. *Ship Technology Research*. 2024. 15 p. DOI 10.1080/09377255.2024.2396197.
46. Bole M., Forrest C. Early stage integrated parametric ship design. *Proceedings of 2nd International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS)*. 2005. P. 447 — 460.
47. Pawling R.G., Percival V., Andrews D.J. A study into the validity of the ship design spiral in early stage ship design. *Journal of Ship Production and Design*. 2017. Vol. 33, Issue 2. P. 81 — 100. DOI 10.5957/JSPD.33.2.160008.
48. Tsakalakos N., Vassalos D., Pusa R. Goal-based ship subdivision and layout. *Proceedings of the 10th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB-2009)*. St. Petersburg, June 2009. P. 687 — 696.
49. Papanikolaou A., Hamann R., Lee B. S., Mains C. et al. GOALDS — Goal Based Damage Ship Stability and Safety Standards. *Accident Analysis and Prevention*. 2013. Vol. 60. P. 353 — 365. DOI 10.1016/j.aap.2013.04.006.
50. Peschmann J., Selle H., Jankowski J.R., Horn G.E. et al. IACS common structural rules as an element of IMO goal based standards for bulk carriers and oil tankers. *Progress in the Analysis and Design of Marine Structures*. London: CRC Press, 2017. DOI 10.1201/9781315157368-39.
51. Resolution MSC.287(87) — Adoption of the international goal-based ship construction standards for bulk carriers and oil tankers / IMO. 2010. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.287\(87\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.287(87).pdf) (accessed 29.05.2025).
52. Papanikolaou A.D. Holistic Approach to Ship Design. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, Issue 11. P. 1717. DOI 10.3390/jmse10111717.
53. Papanikolaou A. Ship Design. Methodologies of preliminary design. Springer Verlag, 2014. 628 p. DOI 10.1007/978-94-017-8751-2.
54. Wang Z., Yang X.Q., Zheng Yu.H., Chen W.C. et al. Interactive ship cabin layout optimization. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 270. P. 113647. DOI 10.1016/j.oceaneng.2023.113647.
55. Latent space. URL: <https://www.latent.space/p/2025-papers> (accessed 14.02.2025).
56. Khan S., Goucher-Lambert K., Kostas K., Kaklis P. ShipHullGAN: a generic parametric modeller for ship hull design using deep convolutional generative model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2023. Vol. 411. P. 116051. DOI 10.1016/j.cma.2023.116051.
57. Ao Y., Li Y., Gong J., Li S. Artificial Intelligence design for ship structures: A variant multiple-input neural network-based ship resistance prediction. *ASME Journal of Mechanical Design*. September 2022. Vol. 144, Issue 9. P. 091707. DOI 10.1115/1.4053816.
58. Furtado L.S., Soares J.B., Furtado V. A task-oriented framework for generative AI in design. *Journal of Creativity*. 2024. Vol. 34, Issue 2. DOI 10.1016/j.joc.2024.100086.
59. Onatayo D., Onososen A., Oyediran A.O., Oyediran H. et al. Generative AI applications in architecture, engineering, and construction: Trends, implications for practice, education & imperatives for upskilling — A review. *Architecture*. 2024. Vol. 4, Issue 4. P. 877 — 902. DOI 10.3390/architecture4040046.

60. Requejo W.S., Martínez F.F., Vega C.A., Martínez R.Z. et al. Fostering creativity in engineering design through constructive dialogues with generative artificial intelligence. *Cell Reports Physical Science*. 2024. Vol. 5, Issue 9. DOI 10.1016/j.xcrp.2024.102157.
61. Kana A.A., Li W., van Noesel I., Pang Y. et al. Application of digital twins in the design of new green transport vessels. *State-of-the-Art Digital Twin Applications for Shipping Sector Decarbonization* / B. Karakostas, T. Katsoulakos (eds.). IGI Global Scientific Publishing, 2024. P. 161 — 191. DOI 10.4018/978-1-6684-9848-4.ch008.
62. Mauro F., Kana A.A. Digital twin for ship life-cycle: A critical systematic review. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 269. P. 113479. DOI 10.1016/j.oceaneng.2022.113479.
63. Michalski J.P. Parametric method of preliminary prediction of the ship building costs. *Polish Maritime Research*. 2004. Special issue. P. 16 — 19.
64. Gaikovich A.I. Ship design theory and its teaching. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. Special edition 1. P. 137 — 141. DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-137-141.