



ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.5.01
EDN VUUQGK

КОНЦЕПЦИЯ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЕКТА СУДНА НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

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

А.В. Косоротов, инженер-кораблестроитель, ООО «Бюро Гиперборея», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская улица, д. 6, лит. А, пом. 511, e-mail: andrey.kosorotov@bureauhyperborea.ru

М.О. Матаруев, инженер-кораблестроитель, ООО «Бюро Гиперборея», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская улица, д. 6, лит. А, пом. 511, e-mail: mikhail.mataruev@bureauhyperborea.ru

А.А. Бахарев, руководитель отдела программной разработки, ООО «Бюро Гиперборея», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская улица, д. 6, лит. А, пом. 511, e-mail: andrey.bakharev@bureauhyperborea.ru

А.Б. Крестьянцев, генеральный директор, ООО «Бюро Гиперборея», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская улица, д. 6, лит. А, пом. 511, e-mail: andrey.krestyantsev@bureauhyperborea.ru

В статье описана концепция создания цифрового двойника (ЦД) проекта судна на основе принципов параметризации, целостности, прямого расчета и моделирования эксплуатации судна в составе транспортной системы. Поясняется отличие подобной модели, пред назначенной для использования на ранних стадиях проектирования, от цифрового двойника физического объекта (изделия). Практическая ценность ЦД проекта обусловлена возможностью его применения в качестве инструмента для выполнения всестороннего проектного анализа судов. Также такой подход имеет потенциал для того, чтобы в будущем перераста в отдельное направление развития теории проектирования судов. На основе представленной концепции ЦД был создан программный макет, который охватывает четыре типа судов ледового плавания: нефтеналивные танкеры, газовозы СПГ мембранныго типа, универсальные сухогрузы и ячеистые контейнеровозы. В макете ЦД учитываются характерные особенности ледовых судов, такие как форма корпуса, наличие концепции двойного действия, специфика нагрузки масс судна порожнем и др. В статье приводятся результаты комплексной верификации ЦД, а также примеры практического использования этой технологии в ходе нескольких исследовательских проектов. Описываются направления дальнейшего методического и технологического развития представленного подхода.

Ключевые слова: цифровой двойник проекта, судно ледового плавания, программное обеспечение, теория проектирования судов, расчетное проектирование.

Для цитирования: Таровик О.В. Концепция и программная реализация цифрового двойника проекта судна на ранних стадиях проектирования / О.В. Таровик, А.В. Косоротов, М.О. Матаруев, А.А. Бахарев, А.Б. Крестьянцев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 137 — 155. — EDN VUUQGK.

CONCEPT AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A DIGITAL SIBLING OF A SHIP AT EARLY DESIGN STAGES

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

A.V. Kosorotov, Shipbuilding Engineer, Bureau Hyperborea LLC, 191015 Russia, St. Petersburg, Kavalergardskaya ul., 6A, pom. 511, e-mail: andrey.kosorotov@bureauhyperborea.ru

M.O. Mataruev, Shipbuilding Engineer, Bureau Hyperborea LLC, 191015 Russia, St. Petersburg, Kavalergardskaya ul., 6A, pom. 511, e-mail: mikhail.mataruev@bureauhyperborea.ru

A.A. Bakharev, Head of Software Development Department, Bureau Hyperborea LLC, 191015 Russia, St. Petersburg, Kavalergardskaya ul., 6A, pom. 511, e-mail: andrey.bakharev@bureauhyperborea.ru

A.B. Krestyantsev, General Director, Bureau Hyperborea LLC, 191015 Russia, St. Petersburg, Kavalergardskaya ul., 6A, pom. 511, e-mail: andrey.krestyantsev@bureauhyperborea.ru

The article presents a concept of developing a digital twin (DT) of a ship at early design stages based on the principles of parameterization, integrity, direct design and modeling of ship operation in a transport system. Difference between such a model, intended for the conceptual design, and a digital twin of a product is described. The practical value of such a project-level DT is due to the possibility of its use as a tool for comprehensive project analysis of ice-going ships. Also, this approach has the potential to develop into a separate branch of ship design theory in the future. Based on the presented concept a project-level DT, a software tool was developed that covers four types of ice-going ships, such as the oil tankers, membrane-type LNG carriers, general-purpose dry cargo ships and cellular container ships. DT takes into account the characteristic features of the ice class: hull shape, presence of the double-acting concept, specifics of the light weight distribution and other factors. The article contains the results of a comprehensive verification of the developed DT, as well as the examples of its practical use during several research projects. Ideas for further methodological and technological development of the presented approach are also described in the article.

Key words: *digital sibling, ice-going ship; software; ship design theory; computational design.*

For citation: Tarovik O.V., Kosorotov A.V., Mataruev M.O., Bakharev A.A., Krestyantsev A.B. Concept and software implementation of a digital sibling of a ship at early design stages. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 137 — 155. EDN VUUQGK. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Сфера интересов российского судостроения неуклонно смещается в стратегически важную арктическую зону, для освоения которой требуются наиболее технологически сложные и во многом уникальные суда. Это является одновременно и вызовом, и окном возможностей для отечественной индустрии, которая вынуждена создавать новые производственные мощности и замещать импортное оборудование в сложных геополитических условиях.

Помимо непростой ситуации в производственной сфере, в настоящее время некоторая инертность наблюдается и в области раннего проектирования судов. Известно, что ранние этапы проектирования посвящены формированию принципиального облика судна и его оптимизации в составе транспортной системы, что исключительно важно с точки зрения будущей эффективности всего проекта. Поэтому соответствующие разработки являются актуальными, а развитие арктического судостроения подразумевает также и развитие методов раннего проектирования судов.

Настоящая статья развивает идеи, изложенные в [1], и предлагает возможное направление для дальнейшего развития теории и практики раннего проектирования, связанное с созданием цифрового двойника (ЦД) проекта судна. Основное прикладное значение такого ЦД заключается в возможности обоснованного формирования технических требований к судну за счет моделирования как его внутренней структуры, так и функционирования в составе морской транспортной системы (МТС). Традиционно эта задача находится на стыке между заказчиком и конструкторским бюро — проектантом и включает детальный проектный анализ и всестороннюю оптимизацию судна. Практический опыт показывает, что эта сфера является своеобразным «слабым звеном» в процессе создания современного арктического транспортного флота и нуждается в соответствующем усилении.

Дальнейшее изложение концепции и программной реализации цифрового двойника проекта судна на ранних стадиях проектирования производится в следующем порядке. В разделе 1 приводится описание термина «цифровой двойник проекта» и поясняется его отличие от традиционного цифрового двойника физического объекта. Раздел 2 посвящен описанию принципов реализации ЦД в проектной сфере, которые

были положены в основу созданного программного макета. Детали реализации ЦД приведены в разделе 3, а в разделе 4 внимание уделено важному вопросу точности получаемых проектных оценок. Примеры практического использования макета ЦД обсуждаются в разделе 5. В заключении оцениваются перспективы внедрения этой технологии и приводится ряд заключительных положений.

1. ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПРОЕКТА СУДНА

Цифровой двойник (ЦД) (digital twin) физического объекта является одной из ключевых технологий Индустрии 4.0 [2]. Он представляет собой некую виртуальную сущность, которая двунаправленно связана с описываемым ею реальным объектом и позволяет моделировать и оптимизировать работу такого объекта в цифровой среде. Изменения в ЦД автоматически отражают изменения в реальной системе и одновременно могут инициировать их, если последнее предусмотрено функционалом цифрового двойника. Некоторую классификацию ЦД по характеру взаимодействия с реальным объектом можно найти в [3], где также описываются другие имеющиеся в литературе варианты названия подобных цифровых сущностей: продуктовый аватар (product avatar), виртуальный двойник (virtual twin), цифровая тень (digital shadow), цифровой суррогат (digital surrogate). Цифровые двойники сложных технических систем широко используются в разнообразных областях техники, однако в судостроении и судоходстве эта технология распространена очень ограниченно — порядка 3 — 4 % от общего числа всех работ, согласно данным [3].

Помимо описания реального физического объекта, технологии цифрового дублирования могут также применяться и на этапе проектирования, когда реального объекта еще не существует. Как было отмечено в [1], подобная цифровая сущность может быть очень важна в случае применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в сфере проектного анализа, поскольку с помощью ЦД проекта ИИ-модель может отслеживать то, как изменения различных характеристик проекта влияют на весь комплекс многочисленных проектных показателей. Важно отметить, что подобные технологии находятся на этапе раннего развития, поэтому в настоящее время не существует общепринятого определения ЦД проекта, а число примеров реализации в области проектирования очень ограничено (см., например, [4] и [5]). Для обозначения некоего упрощенного цифрового двойника судна на этапе проектирования в ряде работ применяется термин «цифровой близнец» (digital sibling) [6], который отражает тот факт, что сходство цифровой сущности и проектируемого объекта нельзя напрямую экстраполировать на реальный физический объект. Несмотря на то, что ЦД судна на этапе проектирования описывает не построенное судно, а лишь его некий виртуальный образ, в зарубежной литературе такую проектную сущность также принято именовать «цифровым двойником». По нашему мнению, для описания модели судна на этапе проектирования более корректно было бы использовать иной термин, например «цифровая модель проекта», однако в соответствии с зарубежной практикой и для простоты мы все же будем использовать обобщенный термин «цифровой двойник проекта», поскольку различия между указанными наименованиями не столь важны для дальнейшего изложения.

Очевидно, что ЦД для разных стадий жизненного цикла судна будут существенно различаться, что обусловлено кардинальным отличием процессов, сопровождающих проектирование технического объекта (особенно на концептуальной стадии), от процессов, происходящих при его эксплуатации. В частности, типичные процессы на этапе эксплуатации судна можно обозначить как «регламентное обслуживание», «диагностика подсистем», «экономия топлива», «обеспечение безопасности» и др. Тогда как на этапах проектирования соответствующие определения будут звучать как, например, «оптимизация обводов», «формирование общего расположения», «вычисление нагрузки масс», «расчеты посадки и остойчивости», «проектирование гребного винта» и т.п. Для описания разных процессов требуется применение принципиально разных технологий и прикладных инструментов, что подтверждает существенную разницу между ЦД реального объекта и ЦД проекта, а также делает возможным самостоятельное развитие последнего направления. В работе [7] высказывается мнение о том, что прикладные решения на основе ЦД имеют потенциал для того, чтобы в будущем стать одной из базовых технологий проектного анализа. Таким образом, можно сказать, что ЦД проекта судна имеет значительные перспективы дальнейшего развития в соответствии с глобальными индустриальными трендами, а работы по созданию соответствующих программных решений можно признать актуальными.

2. ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ

Прикладной цифровой двойник проекта судна может быть реализован на основе четырех базовых принципов:

- параметризация,
- прямой расчет,
- целостность,
- моделирование эксплуатации.

Параметризация при создании ЦД должна носить всеобъемлющий характер и затрагивать всю иерархию внутренних объектов модели, включая главные размерения, детали формы обводов, общее расположение, геометрию судовых пространств (грузовые, балластные и топливные танки), основное оборудование, основные конструкции корпуса, варианты общепроектных решений (ледовый класс, тип движительного комплекса, тип люковых закрытий, варианты системы хранения груза и т.п.). Основными целями параметризации являются максимальное расширение области поиска рациональных проектных решений, а также обеспечение удобства управления ЦД в целом за счет иерархической структурированности параметров. Параметризация может обеспечиваться как непрерывными переменными, которые могут изменяться в определенном интервале, так и наборами дискретных значений (например, категория прочности стали или модельный ряд двигателей). Основная сложность параметризации заключается не только в необходимости управления любым элементом модели на всех уровнях иерархии, но и в обеспечении взаимосвязи взаимозависимых параметров, а также реализации расчетных процедур, адекватно моделирующих реакцию всего ЦД на происходящие изменения. Отдельной большой задачей является определение комплекса значений параметров «по умолчанию», в особенности для параметров нижнего иерархического уровня, которые должны автоматически пересчитываться при изменении вышестоящих значений. Таким образом, полная параметризация должна позволять пользователю изменять и только основные параметры (в этом случае все прочие параметры нижних иерархических уровней принимаются по умолчанию на основе неких усредненных зависимостей), и все или часть параметров нижних иерархических уровней в разрешенных для них диапазонах значений.

Прямой расчет — это концепция построения проектной модели судна, согласно которой на вход модели в явном виде подаются все необходимые параметры, а далее выполняется прямой расчетный анализ того, каким будет соответствующий вариант судна и удовлетворяет ли он всем проектным ограничениям [8]. Поиск окончательного варианта судна при таком подходе предполагает наличие итерационного процесса, в ходе которого человеком-оператором (или ИИ-моделью) выполняются последовательные численные эксперименты и подбираются такие значения входных параметров, при которых все прочие характеристики судна соответствуют требуемым или достигают оптимума. Существенной частью этой концепции является то, что все внутренние проектные параметры определяются преимущественно расчетным образом, а не на основе приблизительных эмпирических соотношений, что должно обеспечивать высокую степень достоверности получаемых результатов. То есть число приближенных формул при создании ЦД следует последовательно минимизировать. Применение концепции прямого расчета очень удобно с точки зрения компьютерной интерпретации процесса проектирования, так как не требует организации логически-сложного алгоритма проектирования судна под заданные параметры, а сводит работу проектной модели к единичному ответу на вопрос «что будет, если...?». Основной задачей при реализации такого подхода является организация вычислительной архитектуры модели, поскольку в момент выполнения каждого локального расчета в системе должны присутствовать все необходимые входные данные. Кроме того, прямое расчетное моделирование возможно только при достаточном уровне детализации информационной модели судна в целом, в которой должны явно присутствовать такие элементы, как модель поверхности, геометрия грузовых пространств и балластных танков, основное оборудование, а также такие проектные сущности, как гидростатические параметры, нагрузка масс, посадка и остойчивость, ходовые качества и т.п. Как показывает наш опыт, требования по относительно высокой детализации ЦД на ранних этапах проектирования не вступают в неразрешимые противоречия с вычислительными возможностями современной компьютерной техники.

Целостность цифрового двойника заключается в равномерном учете всех общесудовых качеств проектируемого судна, что, однако, не исключает возможности более детального рассмотрения отдельных актуальных аспектов. Целостный подход необходим по той причине, что различные изменения внутренних параметров судна могут влиять на совершенно разные интегральные показатели, адекватная оценка которых обеспечивает объективность проектного анализа. Напротив, отсутствие целостного подхода может приводить к однобоким проектам или упущению важных проектных аспектов. Прикладное применение принципа

целостности говорит о том, что в модели судна должны анализироваться грузовместимость, ходкость, удифферентовка, непотопляемость, строительная стоимость, энергоэффективность и другие важнейшие группы технико-эксплуатационных и проектных показателей. Также желательно обеспечивать приблизительно одинаковый уровень детализации ЦД по основным общесудовым направлениям, при этом некоторые локальные аспекты (например, ледовые нагрузки на корпус) могут быть рассмотрены более детально.

Модель эксплуатации в составе ЦД дает возможность оценить влияние любых изменений судна на показатели его функционирования во внешней среде. Сложность этого направления заключается во многообразии факторов и процессов, которые нужно рассматривать в каждом конкретном случае, а также в невозможности создания универсальной модели эксплуатации. Иногда возможно применение достаточно простых моделей аналитического типа, однако в большинстве практических случаев необходимо создание детальных имитационных моделей работы всей МТС [9]. Аналитические модели могут отражать изменение показателей судна в режиме «на лету» и поддерживать возможность оптимизации характеристик проекта с помощью формальных алгоритмов, тогда как детальные модели эксплуатации приходится отделять от модели судна и применять вариантную схему поиска наилучшего решения. Также следует отметить, что поиск наилучших локальных параметров судна зачастую может выполняться вне контекста работы судна в составе МТС. Например, оптимизация конструкций корпуса обычно производится по критерию массы при условии соблюдения технологических ограничений, проектирование формы обводов можно выполнять по критерию сопротивления на чистой воде или во льдах, соблюдая ограничения на интегральные гидростатические параметры корпуса. Если в результате такого локально-оптимизационного подхода появляются варианты, которые требуют рассмотрения на уровне всей МТС, то они могут быть исследованы на вариантной основе. Отметим, подробное описание практической реализации модели эксплуатации судна в составе ЦД выходит за рамки настоящей статьи, поэтому предлагаем заинтересованному читателю ознакомиться с посвященной этому вопросу работой [9].

Реализация описанных выше принципов построения ЦД проекта судна может быть очень различной, как в части базовых решений по программной архитектуре и общей детализации модели, так и в части применяемых программных технологий и специализированных прикладных инструментов. Далее описан опыт авторов по реализации проектных ЦД судов ледового плавания, который был получен в ходе нескольких работ по исследованию систем арктического морского транспорта. Роль ЦД в этих проектах сводилась к формированию вариантных рядов транспортных судов, которые затем анализировались с помощью детализированных имитационных моделей МТС [10].

3. ПРОГРАММНЫЙ МАКЕТ

Текущая версия цифрового двойника проекта судна — это исследовательское приложение уровня программного макета, созданное авторами для подтверждения реализуемости всей концепции, а также для решения тестовых задач. Приложение реализовано на платформе .NET Framework 6.0 с применением стандартных интерфейсных компонентов WPF. При разработке приняты следующие упрощения, которые могут быть существенно переработаны в дальнейшем.

1. ЦД формируется на общих принципах, но адаптируется под каждый сложившийся тип транспортного судна, которых предусмотрено четыре: нефтеналивные танкеры, газовозы СПГ мембранных типа, универсальные сухогрузы и ячеистые контейнеровозы. Создание универсального конфигурируемого ЦД, который не будет жестко привязан к типу судна, возможно, однако это влечет за собой существенное увеличение сложности разработки.

2. Рассматриваются только суда ледового плавания с наклонной формой форштевня, значительное внимание уделяется специализированным ледовым аспектам. В будущем ЦД может быть расширен в направлении традиционных неледовых судов и характерной для них проблематики повышения энергоэффективности при движении по чистой воде.

3. В текущей версии не реализован анализ некоторых аспектов судна, таких как оценка строительной стоимости, расчет непотопляемости и ряд других, что в дальнейшем может быть откорректировано для обеспечения целостности модели.

4. Практически все внутренние (локальные) параметры судна задаются по умолчанию и не могут быть изменены явно, например объем жилой надстройки, диаметр гребного винта и др. Для определения таких значений используются статистические данные по построенным судам. Однако при необходимости соответствующие сущности могут быть детализированы, параметризованы и интегрированы с модулями прямого расчета.

5. Возможности параметрического управления охватывают только форму корпуса и основные проектные характеристики судна. При этом архитектура приложения предусматривает дальнейшую реализацию функционала по управлению, например, положением поперечных переборок, топологией корпусных конструкций, характеристиками оборудования, а также множеством других аспектов.

6. Модель эксплуатации в составе макета ЦД в текущей версии не реализована. Предполагается использование отдельного внешнего приложения — детализированной модели МТС, создаваемой в одной из высокочувствительных сред имитационного моделирования [11].

Принципиальная логическая схема вычислительного процесса макета ЦД, реализующего концепцию прямого расчета, приведена на рис. 1 применительно к танкерам и судам-газовозам СПГ. Напомним, что важными условиями реализации концепции прямого проектирования является автоматическое выполнение всех расчетов, а также наличие на каждом этапе вычислений всех необходимых для этого входных данных. Представленная последовательность вычислительных процессов удовлетворяет этим требованиям.



Рис. 1. Общая схема вычислительного процесса ЦД проекта судна

В начале вычислительного процесса, в блоке ①, задаются (или читаются из внешнего файла) входные данные — информационная модель судна, которая содержит полный перечень параметров, однозначно характеризующих судно и позволяющих выполнять дальнейшие расчеты. В текущей версии такими параметрами являются:

- параметры корпуса судна — определяют главные размерения и судовую поверхность;
- ледовый класс судна;
- мощность на валах и число гребных винтов;
- дальность плавания и доля мощности на проектной скорости;
- наличие у судна опции двойного действия — если да, то применяются ВРК, если нет, то используются традиционные валы;
- тип энергетической установки — малооборотный дизель с прямой передачей на валы, дизель-электрическая установка (ДЭЭУ), атомная установка, двухтопливные двигатели;
- расчетная плотность груза (или масса стандартного контейнера);
- срок службы корпусных конструкций судна и средний предел текучести конструкционной стали;
- число грузовых трюмов по длине корпуса;
- параметры общего расположения — коэффициенты высоты двойного дна, ширины двойного борта, высоты сколового скоса, длины грузовой зоны и машинного отделения и т.п.;
- специализированные параметры для каждого типа судна, моделирующие проектные альтернативы, например варианты системы хранения СПГ или вид люковых закрытий контейнерных трюмов.

Далее в блоке ② выполняется генерация теоретического чертежа по заданным параметрам информационной модели. Для описания судовой поверхности в текущей версии ЦД используется специализированная аналитическая модель корпуса судна ледового плавания [12], в которой содержится около 100 управляющих параметров. Пользовательский интерфейс для работы с формой корпуса в носовой и кормовой оконечностях показан на рис. 2. Отметим, что в текущей версии ЦД модель поверхности является единственным полностью параметризованным элементом. Для каждого управляющего параметра заданы его максимальное и минимальное значения, которые являются функциями от других параметров. Для организации вычислительного процесса была составлена матрица взаимовлияния всех параметров и сформирован такой алгоритм пересчета их значений при изменениях, который исключает необходимость итерационных процедур. Однако вопрос практической параметризации в САПР-системах является достаточно важным, требует отдельного рассмотрения и предполагает несколько различных вариантов решения [13]. Также отметим, что дальнейшая промышленная реализация ЦД подразумевает использование универсальных параметрических NURBS-моделей судовой поверхности.

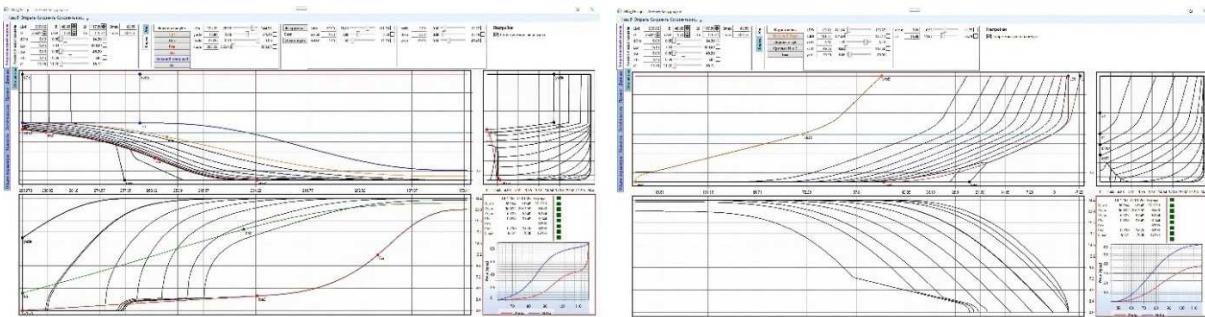


Рис. 2. Пользовательский интерфейс параметрического управления обводами корпуса судна

В блоке ③ выполняется комплекс общепроектных расчетов, в ходе которых на основе статистических данных по построенным судам определяются значения по умолчанию для различных внутренних непараметризованных элементов судна. Исходными данными для расчетов являются параметры информационной модели судна. В этом блоке выполняется расчет диаметра гребных винтов, оценивается электронагрузка на судовые потребители, определяется механическая мощность энергетической установки, производятся расчеты мощности и числа подруливающих устройств, оцениваются размеры жилой надстройки, а также ряда других проектных параметров судна. Для обеспечения таких расчетов по каждому типу судов была собрана представительная статистическая выборка (не менее 50 проектов), которая содержит детальное описание основных характеристики, общего расположения, энергетической установки, грузового оборудования и других важнейших элементов (в общей сложности 80 — 120 параметров по каждому проекту). Основой для формирования выборки послужило издание «Significant Ships» за период 1996 — 2021 годов,

поскольку в нем имеются схемы общего расположения, которые могут быть использованы для оценки необходимых параметров компоновки судна. Дополнительно к этому учитывалась информация специализированных интернет-порталов, а также имеющаяся детальная информация по отдельным проектам судов. Итоговая наполненность статистических выборок достаточно высока и составляет около 95 %. Для обеспечения объективности проектного анализа, в выборку включалось только по одному экземпляру судна каждого проекта. Важно отметить, что наличие статистических данных позволяет оценивать не только среднее значение нужного параметра, но и границы его возможного изменения, которые могут быть представлены в виде функций от других параметров судна. Это использовалось нами при параметризации некоторых судовых элементов в текущей версии ЦД. Например, коэффициент ширины двойного борта изменяется от 0 до 1, где 0 соответствует минимальному статистическому значению (или нормативному ограничению), а 1 — максимальному.

На четвертом ④ шаге формируется схема общего расположения: определяются длины отсеков, устанавливаются водонепроницаемые переборки, формируется двойной борт, двойное дно, определяются районы размещения топливных и балластных танков. Расчеты в этом блоке выполняются с учетом как статистических данных, так и управляющих параметров общего расположения, заданных в информационном описании судна. Расстановка переборок производится в итерационном алгоритме, задачей которого является обеспечение статистически обусловленных объемов машинного отделения, ахтерпика, форпика и помещения подруливающих устройств, при соблюдении ограничений на длины грузовых трюмов. Дальнейшее развитие алгоритмов формирования общего расположения возможно в направлении сокращения количества статистических оценок, замены их прямым моделированием размещения основного оборудования и различных помещений, а также выполнением расчетов непотопляемости и аварийной остойчивости.

Известная схема общего расположения судна позволяет далее сгенерировать геометрию грузовых и балластных танков и точно определить вместимость судна (блок ⑤). Геометрия отсеков строится на основе специальных алгоритмов, которые учитывают как технологические ограничения (например, запрет на формирование поверхностей с двойной кривизной), так и фактические обводы корпуса (отстояние обшивки танка от наружной обшивки). В цифровом двойнике контейнерных судов грузовые трюмы формируются с учетом размеров стандартного блока контейнеров и сложной геометрии обводов судна в оконечностях. Пример сгенерированной схемы общего расположения одного из вариантов газовоза СПГ с ледовым классом Arc7 приведен на рис. 3. Зеленым и синим цветом на схеме показано расположение балластных отсеков и состояние их заполнения (зеленый — пустой, синий — заполненный). Принципиальная схема расположения балластных танков принималась фиксированной и соответствующей компоновке построенных судов. Размещение танка СПГ для судов с двухтопливной энергетической установкой возможно либо на верхней палубе (танк типа С), либо внутри корпуса (мембранный танк).

Блок ⑥ является объемным, однако носит технический характер и позволяет сформировать необходимые данные для дальнейшего расчета посадки и остойчивости судна с использованием расчетных библиотек из системы «Диалог-статика». Интеграция с внешними расчетными библиотеками целесообразна для снижения сложности создания ЦД и удешевления основного внимания существенной части модели, а не программной реализации стандартных инженерных процедур.

После формирования схемы общего расположения производится расчет нагрузки масс судна порожнем. Этот расчет производится комбинированным способом. Наиболее ответственная составляющая нагрузки — масса металлического корпуса, на которую приходится до 70 — 80 % массы судна порожнем, — определяется в специальном модуле (блок ⑦) путем прямого проектирования конструкций центрального отсека по требованиям Правил РС к местной и общей прочности, а также прочности при скручивании (контейнерные суда). Далее масса центрального отсека распространяется на весь корпус по методике [14]. Отметим, что в текущей версии ЦД все параметры топологии конструкций определяются по умолчанию на основе правил, норм и данных прототипов, при этом топология конструкций является одним из возможных направлений для дальнейшей параметризации. Оценка массы конструкций ледовых усилий производится с помощью специализированной методики, изложенной в [15] и позволяющей учитывать особенности формы корпуса судна. Отметим, что наилучшее соответствие натурным данным достигается, если в методике [15] расчетный предел прочности конструкций принимается равным 255 МПа. Массы прочих составляющих нагрузки порожнем определяются в блоке ⑧ на основе статистических данных и расчетов по укрупненным элементам. Для каждой составляющей нагрузки масс вычисляется положение центра масс, что позволяет далее определить положение центра тяжести всего судна. В составе нагрузки масс предусмотрен запас водоизмещения и остойчивости, а также учтены некоторые составляющие, которые не учитываются при оценке строительной стоимости (воздух в корпусе и постоянные жидкие грузы). Пример расчета нагрузки масс для газовоза СПГ с ледовым классом Arc7 приведен на рис. 4.

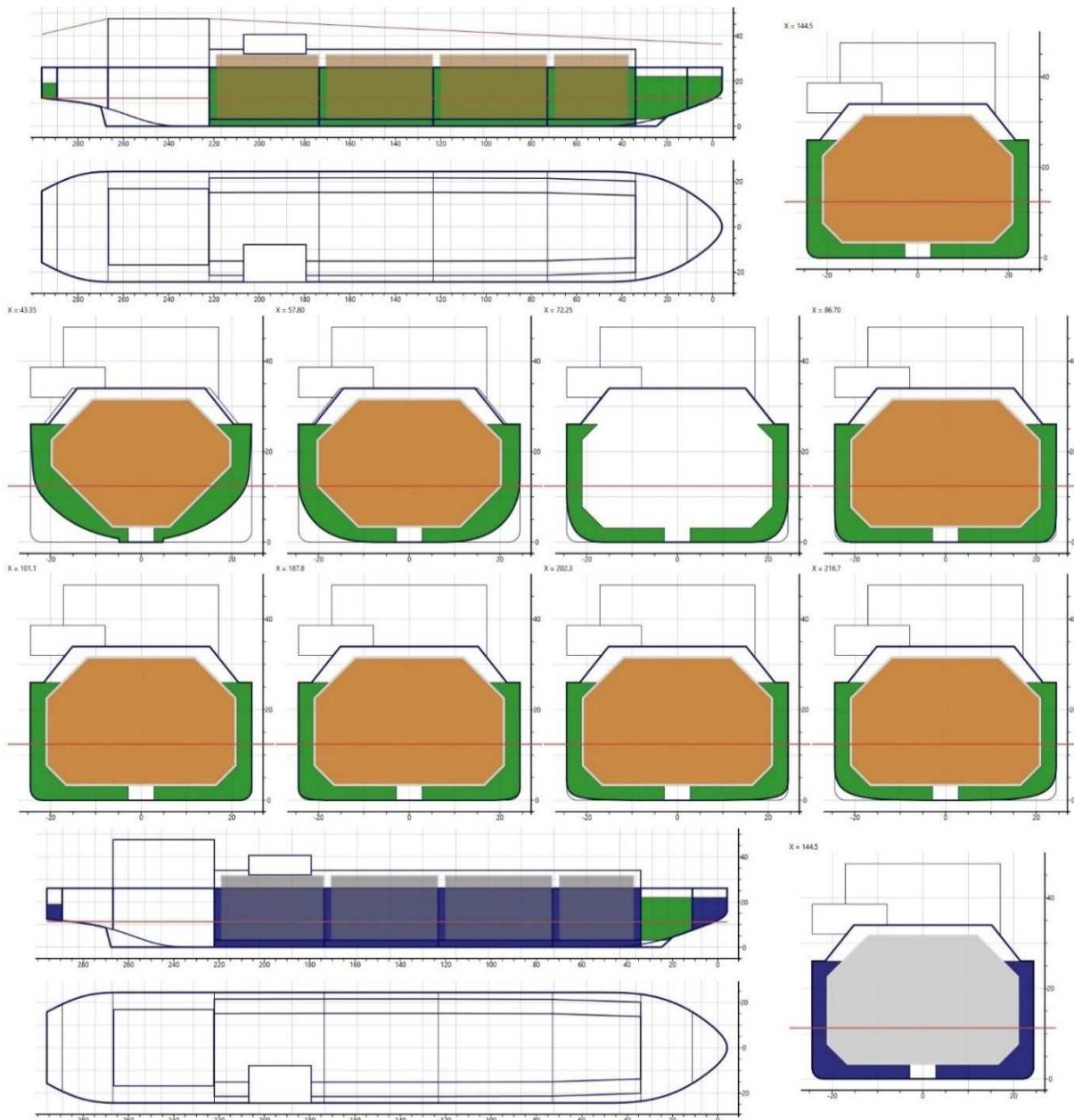


Рис. 3. Схема общего расположения газовоза СПГ с ледовым классом Arc7 при полной загрузке (сверху) и в балласте (снизу). В центре показаны промежуточные поперечные сечения корпуса

В следующем расчетном блоке ⑨ оценивается ходкость судна на чистой воде и во льдах, включая (а) построение кривой буксировочного сопротивления судна на чистой воде с помощью методики [16], которая показала наилучшее совпадение с натурными данными при применении понижающего коэффициента 0,87; (б) оценку коэффициентов взаимодействия винта с корпусом судна на основе эмпирических зависимостей; (в) подбор гребного винта с использованием результатов серийных испытаний [17]; (г) вычисление тяги на швартовном режиме; (д) определение ледопроходимости судна в ходе расчета ледового сопротивления с использованием нескольких полуэмпирических методов.

Информация о ходовых качествах, а также все прочие данные, полученные на данном этапе расчетов, позволяют выполнить расчет дедвейта судна в блоке ⑩. В составе дедвейта выделены четыре базовые составляющие: перевозимый груз, запасы дизельных топлив, запасы топливного СПГ (для двухтопливных ЭУ) и все прочее (экипаж, провизия, пресная вода и др.).

Наименование	Масса (т)	Абсцисса	Аппликата
Металлический корпус			
Основной металлический корпус без надстроек	25533	151.9	14.8
Конструкции надстроек	1957	289.1	36.8
Конструкции компрессорной	150	237.8	37.3
Ледовые усиления	5701	144.5	9.4
Оборудование корпуса			
Мембранные системы хранения груза	3681	128.7	16.6
Грузовые системы и оборудование СПГ	706	137.5	33.7
Общесудовые системы	349	158.1	10.8
Якорное и швартовное устройства	349	78.9	19.9
Подруливающие устройства	17	22.6	7.8
Дельные вещи	791	111.3	27.8
Покрытия, изоляция и окраска	442	178.3	20.2
Прочее оборудование корпуса	186	235.6	29.7
Двигательный комплекс			
Двигатели типа 'Азилод'	1394	294.6	11.7
Дизель-электрическая энергетическая установка на основе СОД			
Главные ДГ на раме с основным оборудованием	1025	244.4	15.6
Аварийный ДГ	0	253.4	31.0
Преобразователи частоты ГЭД	204	253.4	23.4
Трансформаторы ГЭД	225	253.4	23.4
ГРЩ, АРЩ и другие щиты	24	253.4	23.4
Силовой кабель	288	266.8	23.4
Крепления и дополнительные устройства передачи электроэнергии	394	222.1	26.0
Системы и оборудование ЭУ	1250	244.4	18.2
Дополнительные составляющие, не влияющие на строительную стоимость			
Воздух в корпусе	136	144.5	15.6
Запас водоизмещения и остойчивости	900	144.5	20.8
Постоянные жидкие грузы	500	193.6	6.2
Водоизмещение порожнем	46202	165.8	16.2

Рис. 4. Нагрузка масс порожнем газовоза СПГ с ледовым классом Arc7

Расчет посадки и оценка параметров остойчивости судна производится во внешнем блоке ⑪, созданном на основе расчетных библиотек системы «Диалог-статика». Расчеты выполняются для двух-трех характерных состояний загрузки судна, выбранных на этапе создания ЦД.

Проверка остойчивости является последним расчетным процессом, после которого в блоке ⑫ для рассматриваемого варианта судна записываются полученные результаты. Сохранение результатов возможно в любом необходимом формате и с любой степенью детализированности. Сейчас это просто сводная текстовая таблица, в которой подробные данные по всем анализируемым параметрам судна сгруппированы по разделам — см. рис. 5.

Блок ⑬ посвящен постпроцессорному анализу результатов проектирования (см. рис. 6). На этом этапе полученные характеристики судна сопоставляются с данными по построенным неледовым судам из статистической выборки, что позволяет оценить особенности полученного варианта и выбрать направление для дальнейших проектных итераций. Помимо этого, выполняется прямой расчет различных нормативных параметров, которые могут быть сопоставлены с характеристиками проекта. Например, проверяются требования о минимальной мощности на валах (по требованиям Правил Регистра), анализируется фактическая и требуемая высота борта (согласно правилам о грузовой марке) и т.п.

Если проектный облик судна не соответствует желаемому или не выполняются какие-либо ограничения, то пользователь-проектант выполняет корректировку главных размерений корпуса судна, формы обводов или других проектных параметров, и запускает очередную итерацию модели. Отметим, что единичный цикл выполнения расчетов на стандартном офисном компьютере занимает порядка двух секунд, поэтому итерационный процесс может выполняться достаточно динамично.

Таким образом, реализованный макет ЦД проекта судна выполняет основную задачу этой технологии — позволяет однозначно оценить влияние изменений в информационной модели судна на его интегральные проектные характеристики.

Значение	Ед. изм.	Наименование
1. Основные характеристики		
1.1 Основные параметры		
1.2 Вместимость и запасы		
172356	м³	Суммарная вместимость грузовых танков (100%)
28646	м³	Вместимость (100%) 1отсек
48437	м³	Вместимость (100%) 2отсек
48670	м³	Вместимость (100%) 3отсек
46602	м³	Вместимость (100%) 4отсек
1.2.1 Грузовые танки (100%)		
172356	м³	Суммарная вместимость грузовых танков (100%)
28646	м³	Вместимость (100%) 1отсек
48437	м³	Вместимость (100%) 2отсек
48670	м³	Вместимость (100%) 3отсек
46602	м³	Вместимость (100%) 4отсек
1.2.2 Балластные танки (100%)		
69081	м³	Суммарная вместимость балластных танков (100%)
12455	м³	1отсек Бортовой Р/S
15907	м³	2отсек Бортовой Р/S
15947	м³	3отсек Бортовой Р/S
14808	м³	4отсек Бортовой Р/S
2078	м³	Форпик Танк Р/S
8128	м³	Носовые ПУ Танк Р/S
1485	м³	Ахтерник Танк Р/S
1.2.3 Прочие танки и цистерны (100%)		
8640	м³	Цистерны запасов тяжелого и дизельного топлива
740	м³	Танки пресной воды
360	м³	Цистерны машинного масла
1.3 Параметры формы корпуса при проектной осадке		
1.4 Ходовые качества судна на проектной осадке		
21.0	узл	Максимальная скорость на тихой воде
1.64	м	Предельная ледопроходимость на переднем ходу
2.11	м	Предельная ледопроходимость на заднем ходу
16410	кВт	Мощность на валах на скорости 16 узл
101.4	т/с/т	Расход топлива на скорости 16 узл
2. Энергетическая установка и движительный комплекс		
3. Посадка и остойчивость в различных состояниях загрузки		
3.1 Судно в грузу (100% запасов)		
3.2 Судно в балласте (100% запасов)		
4. Нагрузка масс судна порожнем		
4.1 Металлический корпус		
4.2 Оборудование корпуса		
4.3 Двигательный комплекс		
4.4 Дизель-электрическая энергетическая установка на основе СОД		
4.5 Дополнительные составляющие, не влияющие на строительную стоимость		
4.6 Водоизмещение порожнем		
5. Общее расположение		
5.1 Конфигурация продольного расположения		
5.2 Конфигурация мидель-шпангоута		

Рис. 5. Сводная таблица результирующих параметров судна

Параметр	Ед.изм	Проект	Среднее	Мин	Макс
1) Нормативные параметры					
Минимальная мощность на валах по РС (2023)	кВт	45 000		39 328	
2) Статистические параметры					
Количество грузовых танков от Q, Lwl и LBD	-	4.0	4.0		
Грузовместимость Q (100%) от объема корпуса	м³	172 356	187 570	179 050	197 520
Дедвейт летний от Q	т	88 907	93 680	84 450	101 350
Водоизмещение порожнем от LBD	т	46 202	36 700	34 570	38 770
Мощность на валах от Lwl	кВт	45 000	27 020	21 790	30 510
Проектная осадка в функции от Q	м	11.70	11.64	11.24	11.99
Суммарная вместимость танков HFO, MDO и MGO от LBD	м³	6 980	6 500		
Объем балластных танков в функции от объема корпуса	м	69 081	65 837	63 032	69 335
3) Соотношения главных размерений (судно в грузу)					
Отношение L/B в функции от Q	-	6.08	6.22	5.85	6.55
Отношение B/d в функции от Q	-	3.93	3.64	3.39	3.89
Отношение L/D в функции от Q	-	11.41	10.88	10.56	11.26
Отношение B/D в функции от Q	-	1.88	1.74	1.69	1.83
4) Главные размерения (судно в грузу)					
Длина по ватерлинии в функции от Q	м	296.7	287.7	280.2	295.2
Ширина по ватерлинии в функции от Q	м	48.8	46.2	44.8	47.4
Высота борта на миделе в функции от Q	м	26.0	26.4	25.8	27.0
Осадка в грузу на миделе в функции от Q	м	12.41	12.57	12.07	13.07
Коэффициент общей полноты в функции от Q	-	0.734	0.734	0.709	0.759

Рис. 6. Сопоставление варианта газовоза с ледовым классом Arc7 с данными по построенным неледовым судам

4. ВЕРИФИКАЦИЯ

Одной из важных прикладных целей создания ЦД является повышение точности проектных оценок при сокращении затрат времени на их получение. Поэтому верификация ЦД является важным этапом разработки, на котором можно оценить характерный разброс результирующих показателей модели. Идея верификации достаточно проста: на вход ЦД подается информационное описание судна, которое соответствует некоему реальному проекту, а получаемые расчетные интегральные характеристики судна сопоставляются с фактическими. Отметим, что в будущем такой способ воспроизведения реального объекта в ЦД может быть использован не только для верификации, но и для обучения ИИ-модели стандартной проектной практике, т.е. наиболее типичным сочетаниям проектных параметров.

Для верификации были отобраны такие результирующие параметры, которые определяются не напрямую, а являются продуктом взаимодействия различных расчетных блоков. В качестве таких интегральных показателей были выбраны: летний дедвейт; грузовместимость; вместимость по балласту; механическая мощность ДЭУ, ледопроходимость носом вперед и кормой вперед; достижимая скорость на чистой воде; водоизмещение судна порожнем; аппликата и абсцисса центра тяжести (ЦТ) судна порожнем; метацентрическая высота судна в грузу. Например, водоизмещение и ЦТ судна порожнем определяются в результате расчета нагрузки масс по всем составляющим, а этот расчет, в свою очередь, опирается на данные о форме корпуса и общем расположении. Аналогично дело обстоит с вместимостью и дедвейтом, за значениями которых стоит моделирование общего расположения, формирование геометрии грузовых танков, оценка остойчивости и другие факторы. Вместимость балластных цистерн наряду с грузовместимостью отражает то, насколько рационально используются пространства внутри корпуса судна для размещения груза и балласта. Значения ледопроходимости и скорости хода иллюстрируют корректность расчета сопротивлений, подбора гребных винтов и расчетов тяги.

Верификация выполнялась на основе данных по построенным современным судам, среди которых пять нефтяных танкеров («Енисей» класс Arc7; «Штурман Альбанов» класс Arc7; «Василий Динков» класс Arc6; «Кирилл Лавров» класс Arc6; «Mastera» класс Arc4), три газовоза СПГ мембранных типа («Алексей Косыгин» класс Arc7; «Кристоф де Маржери» класс Arc7; проект GTT номер G006 без ледового класса) и один универсальный сухогруз («Норильский Никель» класс Arc7). Большинство данных по этим судам, которые необходимы для формирования информационной модели, были известны, однако некоторые недостающие параметры оценивались приближенно. В основном это касалось формы обводов корпуса. Результаты верификации приведены в сводной табл. 1.

Как видно, относительное стандартное отклонение по большинству параметров не превышает 2 — 5 %. К таким параметрам относятся грузовместимость, дедвейт, вместимость по балласту, достижимая скорость на чистой воде, абсцисса ЦТ судна порожнем и, что немаловажно, водоизмещение судна порожнем. Последнее является одним из ключевых интегральных показателей в предпроектном анализе вариантов судов и формировании вариантов рядов. Несколько большие относительные отклонения (6 — 11 %) характерны для оценок механической мощности ЭУ. При этом значения тяги двигателей на швартовном режиме, которые существенно влияют на ледопроходимость судна, моделируются с отклонением около 5 %. Наибольшие относительные отклонения характерны для оценок аппликаты ЦТ судна порожнем и метацентрической высоты (до 50 %). Это отчасти обусловлено тем, что небольшие абсолютные значения этих параметров формально увеличивают относительные отклонения.

В целом, на основе выполненной верификации можно признать, что реализованный макет ЦД обеспечивает хороший уровень точности прогнозирования проектных параметров. В будущем возможно дальнейшее улучшение расчетных алгоритмов и повышение точности моделей.

Таблица 1
Фактические и расчетные значения параметров судов

Параметр		Енисей	Штурман Альбанов	Василий Динков	Кирилл Лавров	Мастера	Алексей Косыгин	Кристофф де Маржери	Проект G006 фирмы GTT	Норильский Никель
Летний дедвейт, т	ЦД	18 286	43 043	71 446	69 356	105 683	89 287	89 367	77 634	14 370
	Пр	18 569	41 801	71 228	69 830	106 208	89 053	88 500	79 313	14 637
	%	-1,5 %	3,0 %	0,3 %	-0,7 %	-0,5 %	0,3 %	1,0 %	-2,1 %	-1,8 %
Грузовместимость (100%), м ³	ЦД	20 317	54 953	86 471	86 676	123 570	172 703	172 682	150 269	664
	Пр	20 650	54 269	86 368	87 576	123 631	172 900	172 845	150 000	650
	%	-1,6 %	1,3 %	0,1 %	-1,0 %	0,0 %	-0,1 %	-0,1 %	0,2 %	2,2 %
Вместимость по балласту (100 %), м ³	ЦД	12 237	25 876	36 823	36 260	43 541	69 081	72 090	56 904	8060
	Пр	12 450	26 804	37 463	37 794	46 922	70 000	71 510	55 242	8437
	%	-1,7 %	-3,5 %	-1,7 %	-4,1 %	-7,2 %	-1,3 %	0,8 %	3,0 %	-4,5 %
Механическая мощность ЭУ, кВт	ЦД	20 400	30 600	30 600	25 500	23 800	68 000	68 000		18 200
	Пр	19 200	32 000	27 550	26 100	21 080	64 350	64 350		18 000
	%	6,3 %	-4,4 %	11,1 %	-2,3 %	12,9 %	5,7 %	5,7 %		1,1 %
Ледопроходимость носом вперед, м	ЦД	1,41	1,39	1,61	1,0		1,77	1,61		1,42
	Пр	1,5	1,4	1,7	1,0		1,7	1,5		1,5
	%	-6,0 %	-0,7 %	-5,3 %	0,0 %		4,1 %	7,3 %		-5,3 %
Ледопроходимость кормой вперед, м	ЦД	1,55	1,77	1,8	1,54	1,0	2,11	2,04		1,55
	Пр	1,65	1,8	1,7	1,6	1,0	2,1	2,1		1,65
	%	-6,1 %	-1,7 %	5,9 %	-3,8 %	0,0 %	0,5 %	-2,9 %		-6,1 %
Достижимая скорость на чистой воде, уз	ЦД	17,4	18,8	18,0	16,7	15,9	20,9	20,8		17,1
	Пр	17,5	18,7	17,8	16,0	15,5	21,0	21,0		17,3
	%	-0,6 %	0,5 %	1,1 %	4,4 %	2,6 %	-0,5 %	-1,0 %		-1,2 %
Водонизмещение порожнем, т	ЦД	10 428	21 652	22 886	23 507	22 126	46 451	47 628	34 011	10 909
	Пр	10 544	21 350	20 819	24 886	21 726	46 000	47 087	32 395	10 798
	%	-1,1 %	1,4 %	9,9 %	-5,5 %	1,8 %	1,0 %	1,1 %	5,0 %	1,0 %
Аппликата ЦТ судна порожнем, м	ЦД	10,49		13,23	12,92		16,17		16,86	9,81
	Пр	8,93		13,03	12,25		16,95		16,55	9,66
	%	17,5 %		1,5 %	5,5 %		-4,6 %		1,9 %	1,6 %
Абсцисса ЦТ судна порожнем, м	ЦД	57		107,0	112,3		124,0		121,82	62,3
	Пр	61,6		104,66	108,5		131,7		126,77	64,5
	%	-7,5 %		2,2 %	3,5 %		-5,8 %		-3,9 %	-3,4 %
Метацентрическая высота судна в грузу, м	ЦД	1,26			3,1		8,27		3,68	
	Пр	2,6			2,96		8,05		3,27	
	%	-51,5 %			4,7 %		2,7 %		12,5 %	

Примечание. ЦД — расчетные данные цифрового двойника, Пр — фактические данные построенного судна, % — относительное отклонение расчетных результатов от фактических.

5. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Приведем несколько характерных примеров практических работ, в которых необходимые решения по конфигурации арктических МТС были найдены с использованием вариантовых рядов судов, созданных с помощью представленного макета ЦД.

Первый случай. Для вывоза сырья с арктического горнорудного месторождения проектировалось универсальное сухогрузное судно дедвейтом около 40 000 т, которое не имеет прямых аналогов среди существующих судов ни по дедвейту, ни по ледовому классу. В прямых рейсах судно должно обеспечивать перевозку тяжелого рудного концентратта в биг-бэгах, а в обратных — вывоз грузов в стандартных контейнерах. Биг-бэги перевозятся только в трюмах, а контейнеры также и на люковых крышках. Судно должно удовлетворять ограничению по осадке не более 10,5 м в полном грузу. Достоверная оценка характеристики такого судна и его вместимости по рудному концентрату и генеральным грузам невозможна без выполнения детального предпроектного анализа.

Вариантный ряд, созданный при помощи ЦД, включал шесть альтернативных проектов, которые различаются ледовым классом (Arc5 — Arc7), мощностью на валах, типом движительного комплекса (традиционные валы или ВРК), числом винтов (один или два винта), а также параметрами общего расположения. В ходе проектирования было установлено, что обеспечение приемлемого значения метацентрической высоты и, соответственно, показателей качки судна при полной загрузке биг-бэгами возможно только при условии размещения части груза на твиндеке (рис. 7). Большая ширина судна (32 м) приводит к необходимости установки в трюме проницаемой продольной переборки, которая служит опорой для твиндека и позволяет многократно снизить его массу, однако уменьшает контейнеровместимость и увеличивает массу корпуса. С помощью ЦД был выполнен анализ зависимости массы крышек твиндека и показателей остойчивости судна от доли биг-бэгов, размещаемых на нем, а также определена оптимальная проектная загрузка. Кроме того, в ЦД было учтено стремление обеспечить посадку судна на ровный киль в полном грузу без приема балласта, поэтому для каждого варианта судна было рассчитано рациональное распределение груза биг-бэгов по трюмам (рис. 7).

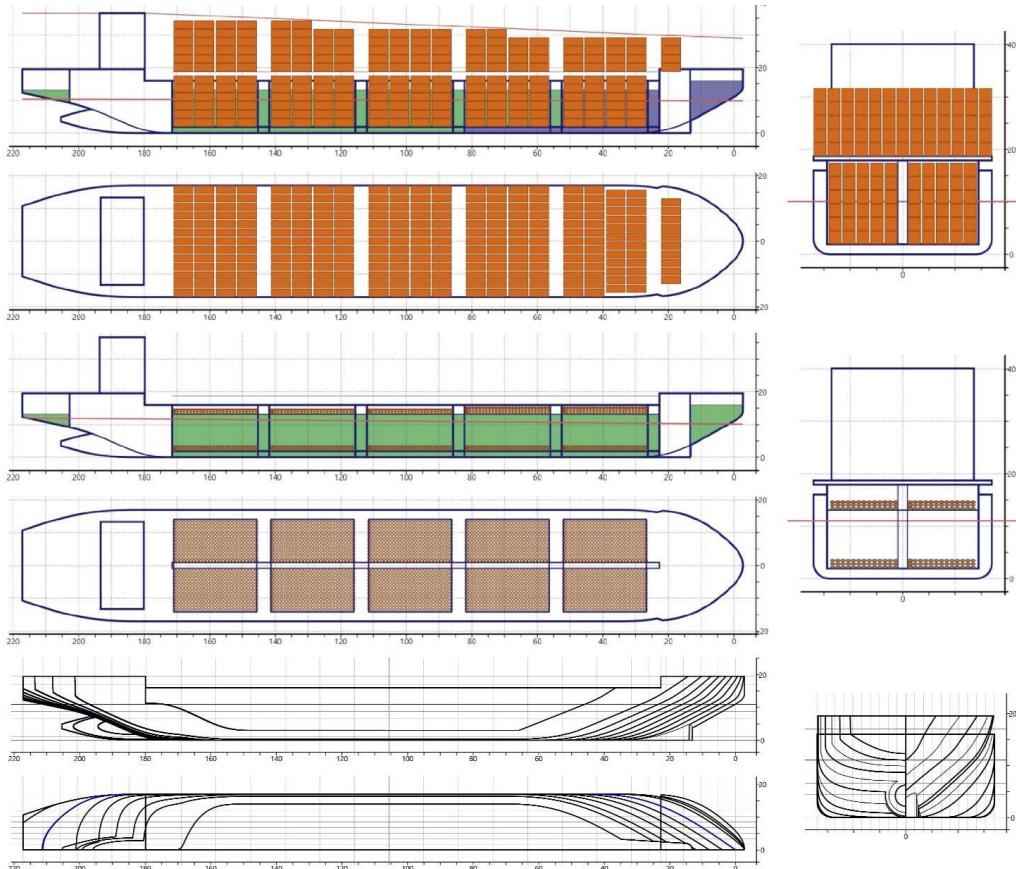


Рис. 7. Схемы размещения контейнеров (сверху) и биг-бэгов (посередине), а также схема теоретического чертежа (снизу) универсального сухогрузного судна с ледовым классом Arc5

Второй случай. При анализе системы вывоза СПГ с арктического месторождения необходимо было рассмотреть вариант мелкосидящего судна-газовоза, способного входить в Обскую губу минуя Морской канал. Осадка такого судна в полном грузу должна быть не более 9,5 м, грузовместимость при этом следует максимизировать. В ходе проектирования с применением ЦД была достигнута вместимость около 73 000 м³ при условии соблюдения ограничений на геометрию мембранных емкостей и ограничений по характерным соотношениям главных размерений газовозов СПГ такого типоразмера. Полученные характеристики мелкосидящего арктического газовоза и их сопоставление с судном вместимостью около 170 000 м³ приведены в табл. 2 и на рис. 8. Отметим, что формирование вариантов рядов судов при помощи ЦД обеспечивает адекватность сопоставительного анализа проектных характеристик, чего, например, не достигается в случае, если разные варианты прорабатываются разными проектантами, имеющими различную технологическую и методическую базу.

Таблица 2
Характеристики расчетных вариантов газовозов СПГ с ледовым классом Arc7

Параметр	Мелкосидящий вариант	Традиционный вариант
Суммарная грузовместимость (100 %), м ³	72 711	173 140
Скорость естественного испарения в грузу, % в сут	0,179	0,133
Производительность грузовых насосов, м ³ /ч	6900	15 000
Длина максимальная, м	235	300,0
Длина по ватерлинии в грузу, м	220,1	293,5
Ширина максимальная, м	38	48,8
Высота борта на миделе, м	20,8	26
Осадка судна в грузу на миделе, м	9,5	12,2
Водоизмещение судна в грузу, т	63 078	132 189
Коэффициент общей полноты судна в грузу	0,774	0,738
Коэффициент полноты ватерлинии судна в грузу	0,923	0,905
Механическая мощность ЭУ, кВт	34 000	68 000
Число и мощность ВРК, кВт	2 × 12 000	3 × 15 000
Максимальная скорость на тихой воде, уз	18,5	20,9
Угол наклона форштевня, град	30	20,2
Угол входа ватерлинии, град	41,3	41,6
Угол развала борта на миделе, град	0	0
Предельная ледопроходимость носом, м	1,4	1,65
Предельная ледопроходимость кормой, м	1,6	2,2
Мощность на валах (кВт) на скорости 16 уз	13 455	16 506
Длина носового заострения ватерлинии, м	37,1	73,4
Длина кормового заострения ватерлинии, м	40,6	50,8
Длина цилиндрической части ватерлинии, м	142,2	164,1
Вместимость балластных цистерн (100 %), м ³	35 214	70 139
Водоизмещение судна порожнем, т	26 462	46 151
Масса металлического корпуса, т	19 269	33 280

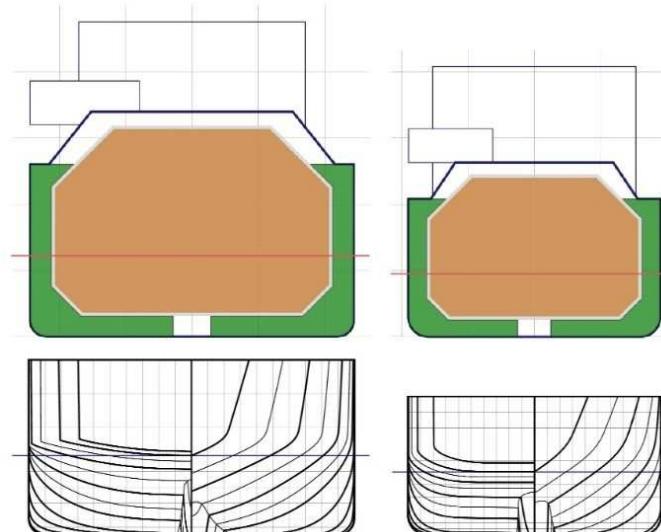


Рис. 8. Сопоставление поперечных сечений и теоретических чертежей традиционного (слева) и мелкосидящего (справа) вариантов арктических газовозов СПГ

Третий случай. При исследовании работы круглогодичной арктической контейнерной линии [11] рассматривался вариантный ряд перспективных арктических контейнеровозов, не имеющих близких прототипов. Целевое значение контейнеровместимости находилось в диапазоне 5000 — 6000 TEU, ледовый класс Arc7 или Arc8, помимо этого, рассматривались различные типы энергетической установки и движительного комплекса. В результате было сформировано 19 альтернативных вариантов судов. Применение ЦД позволило выявить несколько неочевидных на первый взгляд проектных аспектов, которые отличают контейнеровозы с высоким ледовым классом от неледовых судов этого типа.

Во-первых, выяснилось, что традиционная проблема недостаточной остойчивости у ледовых контейнеровозов решается несколько проще, чем у неледовых, так как существенная масса ледовых усилий снижает аппликату центра тяжести всего судна. Поэтому при прочих равных условиях количество палубных контейнеров на ледовом контейнеровозе может быть увеличено.

Во-вторых, удалось установить интересные особенности влияния ледокольной формы корпуса на удифферентовку контейнеровоза рассматриваемой вместимости. Известно, что при полной загрузке абсцисса центра тяжести судна оказывается смещенной в корму, и для удифферентовки требуется принятие балласта в носовые танки. Это происходит из-за кормового расположения центра тяжести судна порожнем (поскольку машинное отделение находится в корме), а также из-за смещения в корму центра тяжести блока палубных контейнеров, который на виде сбоку имеет характерную трапециевидную или треугольную форму с вершиной в районе надстройки (такое распределение диктуется условиями видимости с ходового мостика). Для обеспечения посадки на ровный киль с минимальным количеством балласта на неледовых контейнеровозах центр величины существенно смешают в корму путем заострения носовых обводов и придания значительной S-образности носовой ветви ватерлинии. Однако такое решение оказывается невозможным на арктических судах из-за выпуклой формы носовой ватерлинии, приводящей к увеличению полноты носовой оконечности. Уменьшение же объема носовой части судна за счет увеличения длины носового заострения также нерационально, поскольку приводит к уменьшению вместимости. Как альтернативный вариант, можно попробовать сместить центр величины в нужном направлении за счет увеличения объема кормы, однако возможности такого подхода также ограничены, поскольку большие объемы как носовой (выпуклая ватерлиния), так и кормовой частей корпуса приводят к чрезмерному увеличению коэффициента общей полноты судна, что может существенно ухудшить картину обтекания на высоких скоростях. Решение указанного проектного противоречия было найдено в ходе выполнения численных экспериментов с созданным ЦД. Оказалось, что выходом из ситуации является применение наклонного на 7 — 10 градусов борта в средней части судна. Это позволяет снизить коэффициент общей полноты до требуемых значений (около 0,73 — 0,75) и путем приемлемого приполнения кормы сместить центр величины в необходимом направлении, сохранив при этом как контейнеровместимость, так и благоприятную форму обводов для движения по чистой воде. Помимо этого, наклонный борт оказывает благоприятное влияние на ледовые нагрузки и ледовую управляемость, поэтому все суда сформированного вариантного ряда имели наклонный борт.

Дальнейшее техническое проектирование выбранного варианта судна выполнялось при сохранении базовых проектных параметров, заложенных на концептуальной стадии (см. рис. 9). Была существенно доработана форма кормовой оконечности, увеличены объемы танка СПГ, изменена геометрия носовых контейнерных трюмов. Интересно отметить, что в ходе технического проектирования были подтверждены полученные в ЦД оценки важнейших характеристик судна, таких как водоизмещение порожнем, достигимая скорость хода и предельная ледопроходимость.

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что цифровой двойник проекта может существенно улучшить представление проектанта о создаваемом объекте на концептуальном уровне, делая возможным рассмотрение самых разных проектных альтернатив. Эта технология делает возможным обоснованный и достаточно быстрый анализ проектных противоречий, позволяет выявить характерные закономерности, а также обеспечить многовариантность процесса проектирования. Можно отметить, что непосредственное использование ЦД через некоторое время формирует у пользователя количественное понимание известных качественных закономерностей, таких как, например, зависимость ходкости и массы корпуса от длины, влияние отношения ширины к осадке на показатели остойчивости и многие другие.

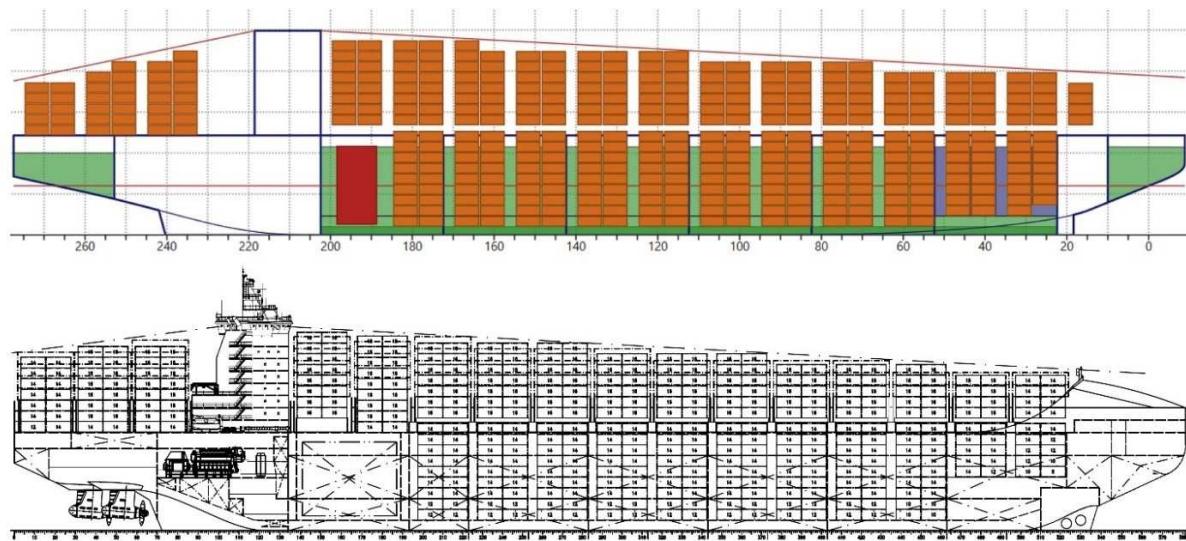


Рис. 9. Схемы общего продольного расположения арктического контейнерного судна, полученные по результатам предпроектного анализа в цифровом двойнике (сверху) и в ходе технического проектирования (снизу)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе описана прикладная технология создания цифрового двойника проекта судна на основе таких принципов, как параметризация, целостность и прямой расчет. Моделирование работы проектируемого судна во внешней среде предполагается с применением детализированных имитационных моделей и вариантового подхода, подразумевающего отделение модели судна от модели эксплуатации. Созданный макет ЦД, а также опыт выполненных работ позволяют сделать обоснованный вывод о работоспособности, практической востребованности и существенном потенциале этой технологии.

Практическая востребованность этого направления при проектировании арктических судов обусловлена необходимостью выполнения многовариантных проектных проработок, в ходе которых могут быть найдены наиболее рациональные характеристики судна. Однако в настоящее время отечественная практика сложилась таким образом, что проектанты предпочитают двигаться в пространстве возможных решений преимущественно «наощупь», ориентируясь на собственный опыт, доступные прототипы, качественные закономерности и используя для выполнения количественных оценок приблизительные соотношения или простые аналитические модели. Вследствие высокой трудоемкости САПР-ориентированных 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.

Выходом из этой ситуации может стать создание прикладных проектных решений, направленных на поддержку исследовательского и концептуального проектирования судна, в том числе в использовании описанной технологии цифрового дублирования. Дальнейшее развитие такой технологии подразумевает решение ряда теоретических и прикладных вопросов.

Круг теоретических вопросов охватывает как задачи, которые можно отнести к фундаментальным (интеграция ИИ-моделей с проектными моделями судов, см. [1]), так и менее масштабные, относящиеся к проектированию вычислительной архитектуры, формированию подходов к параметризации модели судна на разных уровнях иерархии, поиску целесообразного уровня детализации модели судна, а также множеству других аспектов, упомянутых в разделах 2 и 3.

Вопросы, относящиеся к прикладным, являются наиболее обширными. Описанный в настоящей работе макет ЦД реализован при помощи достаточно простых технологий, поэтому дальнейшее развитие предполагает его существенную переработку. В частности, необходим переход на универсальные параметрически управляемые модели судовой поверхности; формат представления внутренней геометрии отсеков должен быть изменен с каркасного на поверхностный; возможно расширение объектной модели ЦД

в направлении универсального инструмента для разных типов гражданских судов. Помимо этого, существенной проработки требует алгоритмическая часть ЦД, в которую входит расстановка оборудования и формирование общего расположения судна, расчеты посадки, остойчивости и непотопляемости, определение размеров конструкций, оценка ходовых качеств судна на чистой воде и во льдах, а также многие другие задачи. Перспективной идеей в этом направлении является создание базы знаний, содержащей соответствующие данные и алгоритмы и находящейся в открытом доступе [18] по аналогии с открытыми (open-source) программными кодами.

Завершить настоящее обсуждение хотелось бы упоминанием наиболее удачных прототипов, детальное изучение которых позволит почертнуть новые методические и технические идеи. Полагаем, что в методическом смысле наиболее интересным образом является проект HoliShip [4], о котором имеется множество открытых публикаций, а наибольший технический интерес, на наш взгляд, представляет система NAPA, которая достаточно хорошо описана в открытых источниках и которая содержит не только блоки концептуального проектирования судов, но и модели оперативного управления и оптимизации работы флота.

БЛАГОДАРНОСТИ

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. 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.
2. Javaid M. Digital Twin applications toward Industry 4.0: A review / M. Javaid, A. Haleem, R. Suman // Cognitive Robotics. — 2023. — Vol. 3. — P. 71 — 92. — DOI 10.1016/j.cogr.2023.04.003.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Papanikolaou A. Ship design in the era of digital transition / A. Papanikolaou, S. Harries, E. Boulogouris, S.O. Erikstad, A.A. Kana // International Marine Design Conference (IMDC-2024). Amsterdam, Netherlands, June 2024. — 40 p. — DOI 10.59490/imdc.2024.784.
7. 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.
8. Таровик О.В. Применение методов прямого проектирования судов как средства информационного обеспечения имитационных моделей морских транспортных систем / О.В. Таровик, А.Г. Топаж, А.Б. Крестьянцев // Седьмая междунар. науч.-практ. конф. «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2023): тр. конф. — СПб.: ИПК «НП-Принт», 2023. — С. 213 — 225. [Электронный ресурс] URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/ikm-mtmts-2023-213-225.pdf> (дата обращения 08.09.2025).
9. 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.
10. Топаж А.Г. Имитационное моделирование на разных стадиях жизненного цикла транспортной системы — что нужно заказчику кроме самой модели? / А.Г. Топаж, О.В. Таровик, А.Б. Крестьянцев // М-лы Междунар. форума Kazan Digital Week — 2022 (KDW-2022). Казань, 21 — 24 сентября 2022 г. [Электронный ресурс] URL: <https://bureauhyperborea.ru/wp-content/uploads/2022/10/Doklad-Topazh-KDW.pdf> (дата обращения 08.09.2025).
11. Выполнены разработка комплексной имитационной модели транспортной системы СМТК и оптимизация основных характеристик судов по договору с компанией АО «ЦНИИМФ». 23.06.2021. [Электронный ресурс] URL: https://bureauhyperborea.ru/cniiimf_rusatomcargo_smrk/ (дата обращения 08.09.2025).
12. Таровик О.В. Аналитическая модель поверхности корпуса судна ледового плавания / О.В. Таровик // Труды Крыловского гос. науч. центра. — 2015. — № 86 (370). — С. 173 — 188.
13. Camba J.D. Parametric CAD modeling: An analysis of strategies for design reusability / J.D. Camba, M. Contero, P. Company // Computer-Aided Design 63. — 2016. — P. 101 — 117. — DOI 10.1016/j.cad.2016.01.003.
14. Watson D.G.M. Practical ship design. Vol. 1 / D.G.M. Watson. — Elsevier, 1998. — 566 p.
15. Таровик О.В. Методика определения масс конструкций ледовых усилений транспортных судов на ранних стадиях проектирования: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / О.В. Таровик. — СПб., 2015. — 23 с. — DOI 10.13140/RG.2.2.36326.88640.

16. Косоротов А.В. Метод оценки буксировочного сопротивления современных ледоколов и судов ледового плавания на чистой воде / А.В. Косоротов // Труды Крыловского гос. науч. центра. — 2020. — № 1 (391). — С. 29–41. — DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-391-29-41.
17. Справочник по теории корабля: в 3 т. / под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985.
18. Суслов А.Н. Перспективные направления развития и наполнения электронной базы знаний по проектированию судов / А.Н. Суслов, О.В. Одегова, Я. Лян, Т. Сунь, Ф. Ван // Труды Крыловского гос. науч. центра. — 2020. — Специальный выпуск 1. — С. 131 — 136. — DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-131-136.

REFERENCES

1. Tarovik O.V. An overview 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.)
2. Javaid M., Haleem A., Suman R. Digital Twin applications toward Industry 4.0: A review. *Cognitive Robotics*. 2023. Vol. 3. P. 71 — 92. — DOI 10.1016/j.cogr.2023.04.003.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Papanikolaou A., Harries S., Boulougouris E., Erikstad S.O., Kana A.A. 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.
7. 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.
8. Tarovik O.V., Topaj A.G., Krestyantsev A.B. Primenenie metodov pryamogo proektirovaniya sudov kak sredstva informatsionnogo obespecheniya imitatsionnykh modelei morskikh transportnykh sistem [Methods of direct vessel design as an information support tool for simulation models of marine transport systems]. *7th International scientific-practical conference «Simulation and complex modelling in marine engineering and marine transporting systems» (SCM MEMTS-2023)*. Conference materials. St. Petersburg: IPK NP-Print, 2023. P. 213 — 225. URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/ikm-mmts-2023-213-225.pdf> (accessed 08.09.2025).
9. Tarovik O.V., Topaj A.G., Krestyantsev A.B., Kondratenko A.A. Arctic marine transport system simulation: Multidisciplinary approach fundamentals and practical experience. *Arktika: Ekologiya i Ekonomika [The Arctic: Ecology and Economy]*. 2017. No 1 (25). P. 86 — 101. (In Russ.)
10. Topaj A.G., Tarovik O.V., Krestyantsev A.B. Imitatsionnoe modelirovanie na raznykh stadiyakh zhiznennogo tsikla transportnoi sistemy — chto nuzhno zakazchiku krome samoi modeli? [Simulation modeling at different stages of the life cycle of a transport system — what does the customer need besides the model itself?] *International forum Kazan Digital Week — 2022 (KDW-2022)*. Kazan, Russia, 21 — 24 September 2022. URL: <https://bureauhyperborea.ru/wp-content/uploads/2022/10/Doklad-Topazh-KDW.pdf> (accessed 08.09.2025).
11. Vypolneny razrabotka kompleksnoi imitatsionnoi modeli transportnoi sistemy SMTK i optimizatsiya osnovnykh kharakteristik sudov po dogovoru s kompaniei AO «TsNIIMF» [The development of a comprehensive simulation model of the SMTK transport system and the optimization of the main characteristics of vessels under a contract with JSC CNIIMF have been completed]. URL: https://bureauhyperborea.ru/cniimf_rusatomcargo_smtk/ (accessed 08.09.2025).
12. Tarovik O.V. Analytical model of icegoing ships hull surface. *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2015. No 86 (370). P. 173 — 188. (In Russ.)
13. Camba J.D., Contero M., Company P. Parametric CAD modeling: An analysis of strategies for design reusability. *Computer-Aided Design* 63. 2016. P. 101 — 117. DOI 10.1016/j.cad.2016.01.003.
14. Watson D.G.M. Practical ship design. Vol. 1. Elsevier, 1998. 566 p.
15. Tarovik O.V. Metodika opredeleniya mass konstruktsii ledovykh usileneii transportnykh sudov na rannikh stadiyakh proektirovaniya [Methodology for determining the masses of ice strengthening structures of transport vessels at early design stages: abstract of PhD thesis]. St. Petersburg, 2015. 23 p. DOI 10.13140/RG.2.2.36326.88640. (In Russ.)
16. Kosorotov A.V. Towing resistance assessment method for modern icebreakers and ice-going vessels in open water. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. Issue 1 (391). P. 29 — 41. DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-391-29-41. (In Russ.)
17. Handbook in ship theory: in 3 vols / Ya.I. Voitkunskii (ed.). Leningrad: Shipbuilding, 1985. (In Russ.)
18. Suslov A.N., Odugova O.V., Lian Y., Siun T., Van F. Promising directions for the development and population of electronic knowledgebases on ship design. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. Special Issue 1. P. 131 — 136. DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-131-136. (In Russ.)