

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПРЯМОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ
КАК СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ МОРСКИХ
ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

О.В. Таровик, А.Г. Топаж, А.Б. Крестьянцев (Санкт-Петербург)

Введение. Анализ морских транспортных систем (МТС) и проектная оптимизация характеристик судов традиционно являются отдельными направлениями исследований, которые находятся в единой области морского транспорта. Методы оптимизации судов применяются в основном «проектантами-судостроителями», а анализом работы флота занимаются преимущественно «логисты-операторы». Однако поскольку транспортное судно создается проектантом для работы в составе логистической системы, он вынужден так или иначе учитывать при проектировании требования этой внешней по отношению к судну логистической среды. Равным образом и «логист» в своей работе так или иначе учитывает проектные аспекты. История взаимодействия этих двух смежных направлений достаточно обширна, поэтому здесь отметим только наиболее важные для дальнейшего изложения моменты.

В 1960-х годах в области проектирования судов зародилось направление, разделяющее общую задачу проектирования на «внутреннюю» и «внешнюю» [1]. Этот подход предполагает, что в ходе решения «внешней» задачи на основе упрощенной модели судна осуществляется технико-экономическое моделирование МТС и оптимизационный поиск наилучших значений основных параметров судна в непрерывном пространстве по экономическому критерию. К основным параметрам судна относятся те параметры, которые в наибольшей степени влияют на его экономическую эффективность (дедвейт, проектная скорость хода, соотношения главных размерений и другие – так называемые «параметры технического задания»). Для решения этой задачи используются методы математического программирования или комбинаторной оптимизации. Далее, в рамках «внутренней» задачи, осуществляется собственно проектирование судна, в том числе на основе традиционной «проектной спирали» [2]. Причем каждая подсистема судна должна оптимизироваться в соответствии с критерием «внешней» задачи, т.е. критерием верхнего уровня (например, удельной стоимостью доставки тонны груза). На основе такого технико-экономического оптимизационного подхода в период с 1960-х по 1990-е годы произошло кардинальное изменение облика транспортного флота [2, 3]. По сравнению с периодом 1960-х годов многократно возросли грузопместимости судов, увеличились коэффициенты общей полноты, снизились скорости хода, были существенно оптимизированы формы обводов, снижены расходы топлива. Можно даже сказать, что принципиальный проектный облик современных транспортных судов практически всех типов (танкеры, газовозы LNG, универсальные сухогрузы, контейнеровозы, газовозы LPG и многие другие) окончательно сформировался в конце 1990-х – начале 2000-х годов, а в последние два десятилетия значимых изменений в этой области практически не происходит.

Эта «эволюционная пауза» вызвана тем, что в ходе оптимизации судов индустрия неизбежно уперлась в ограничения по: 1) габаритам судов (например, образовались типоразмеры судов Handysize, Panamax, Aframax и многие другие), 2) размерам товарной

партии перевозимого груза (например, европейская портовая инфраструктура СПГ ориентирована на единичную партию СПГ в размере 150–170 тыс. м³), 3) энергоэффективности судна (снижение скорости ниже экономической нецелесообразно) и (4) традиционным срокам доставки грузов (быстрая доставка относительно дешевых грузов нерентабельна). Эти ограничения в настоящее время фактически обесмысливают описанную выше задачу оптимизации, поскольку оптимальными оказываются именно граничные значения характеристик судна. Современное развитие в области проектирования судов происходит по более «локальным» направлениям, насыщенным интеллектуальными технологиями, например, безэкипажное судовождение, отход от проектирования, основанного на предписывающих правилах, оптимизация судна под конкретные задачи [4] (goal-based design) и другие. Основные проектные параметры судов (емкость, скорость, главные размерения и т.п.) при этом практически не изменяются.

Очевидно, что в этих условиях оптимизация параметров «технического задания» на основе упрощенных непрерывных моделей более не является актуальной, а основной фокус интереса смещается в область детализированных моделей судна, имеющих большее отношение к «внутренней» задаче. В 2010-х годах появилась концепция «цифрового двойника» [5] – виртуальной модели различных объектов, систем и процессов. Частью этой концепции является имитационная модель – технология, позволяющая детально воспроизводить поведение изучаемой системы в ходе ее эксплуатации во времени. Применительно к транспортным системам имитационное моделирование активно применяется на этапах проектирования и фактической эксплуатации МТС, причем существует определенная специфика создания модели для различных стадий жизненного цикла прототипа. Однако общей их особенностью является достаточно высокая степень детализированности и воспроизведение множества процессов помимо собственно транспортировки (динамика наполнения хранилищ, погода в портах, ледовые и ветроволновые условия на маршруте и многие другие). Более детальное описание сути такого моделирования применительно к арктическим МТС представлено в работе [6].

Однако помимо собственно имитационной модели в современных условиях, в том числе и в рамках концепции «цифрового двойника», оказываются нужны дополнительные компоненты-подмодели, тесно связанные с конкретной предметной областью. В случае исследования МТС в качестве таких компонентов выступают проектные модели транспортных судов, позволяющие исследовать принципиальный облик судна в многомерном пространстве проектных альтернатив. Для создания таких моделей требуется достаточно глубокое погружение в предметную область судостроения в самых разных ее аспектах – общепроектный анализ, расчеты сопротивления во льдах и на чистой воде, моделирование движителей, посадка и остойчивость, расчеты прочности и другие.

Результаты работы проектной модели представляются в виде вариантного ряда исследуемых судов, работа которых потом может быть детально исследована в составе имитационных моделей МТС. То есть оптимизация судна фактически производится путем анализа достаточно подробно проработанных альтернативных судов с помощью детализированной имитационной модели. С практической точки зрения такой подход оказывается наиболее востребованным.

Далее в настоящей работе описана концепция создания проектных моделей транспортных судов и приведены примеры их практической реализации и интеграции с имитационными моделями.

Создание проектной модели на основе концепции прямого расчета.

В основу проектной модели положена концепция «прямого расчета», принципиальное описание которой можно найти, например, в работах [7] (применительно к накатным судам для чистой воды) и [8] (арктические суда снабжения). Концепция заключается в том, что на вход проектной модели в явном виде подаются все необходимые основные параметры судна, а в самой модели выполняется лишь анализ того, возможна ли реализация данного судна (т.е. выполняются ли все проектные ограничения) при данных значениях входных параметров. Это предполагает наличие итерационного процесса, в ходе которого пользователем должны быть подобраны такие значения входных параметров, при которых все прочие характеристики судна соответствуют требуемым. Такой подход к проектированию на ранней стадии удобен для реализации в составе компьютерных решений и обеспечивает гибкость анализа проектных альтернатив (например, рассмотрение судов с нетипичными соотношениями главных размерений). Принципиальная логическая схема созданной проектной модели применительно к танкерам и судам-газовозам СПГ приведена на рис. 1.

В начале вычислительного процесса, в блоке ②, задаются входные параметры. Задание параметров может выполняться пользователем-проектантом как напрямую, так и с использованием результатов неких приближенных моделей ①. В качестве входных параметров основной расчетной модели задаются:

- главные размерения судна;
- ледовый класс;
- мощность на валах и число гребных винтов;
- наличие концепции двойного действия (если да, то применяются врк, если нет, то используются традиционные валы);
- тип энергетической установки;
- расчетная плотность груза;
- срок службы корпусных конструкций судна и средний предел текучести конструкционной стали;
- число грузовых трюмов по длине корпуса судна;
- коэффициенты общего расположения (коэффициент высоты двойного дна, ширины двойного борта, высоты скулового скоса, длина носовой и грузовой зоны, длина машинного отделения и т.п.).

Следующим этапом вычислительного процесса является формирование обводов корпуса судна в блоке ③. Для этого используется специальная параметрически управляемая аналитическая модель поверхности корпуса судна ледового плавания [9]. Пример схемы теоретического чертежа одного из рассматриваемых вариантов судов приведен на рис. 2. Благодаря наличию теоретического чертежа далее становится возможным выполнить комплекс различных расчетов, в ходе которых формируется общее расположение судна, определяется нагрузка масс, рассчитывается вместимость грузовых и балластных танков и т.п.

В блоке ④ выполняется комплекс общепроектных расчетов, которые необходимы для дальнейшего проектирования. Здесь выполняется расчет диаметра гребных винтов, оценивается электронагрузка на судовые потребители, определяется механическая мощность энергетической установки, выполняется расчет мощности и числа подруливающих устройств, оцениваются размеры жилой надстройки и т.п.

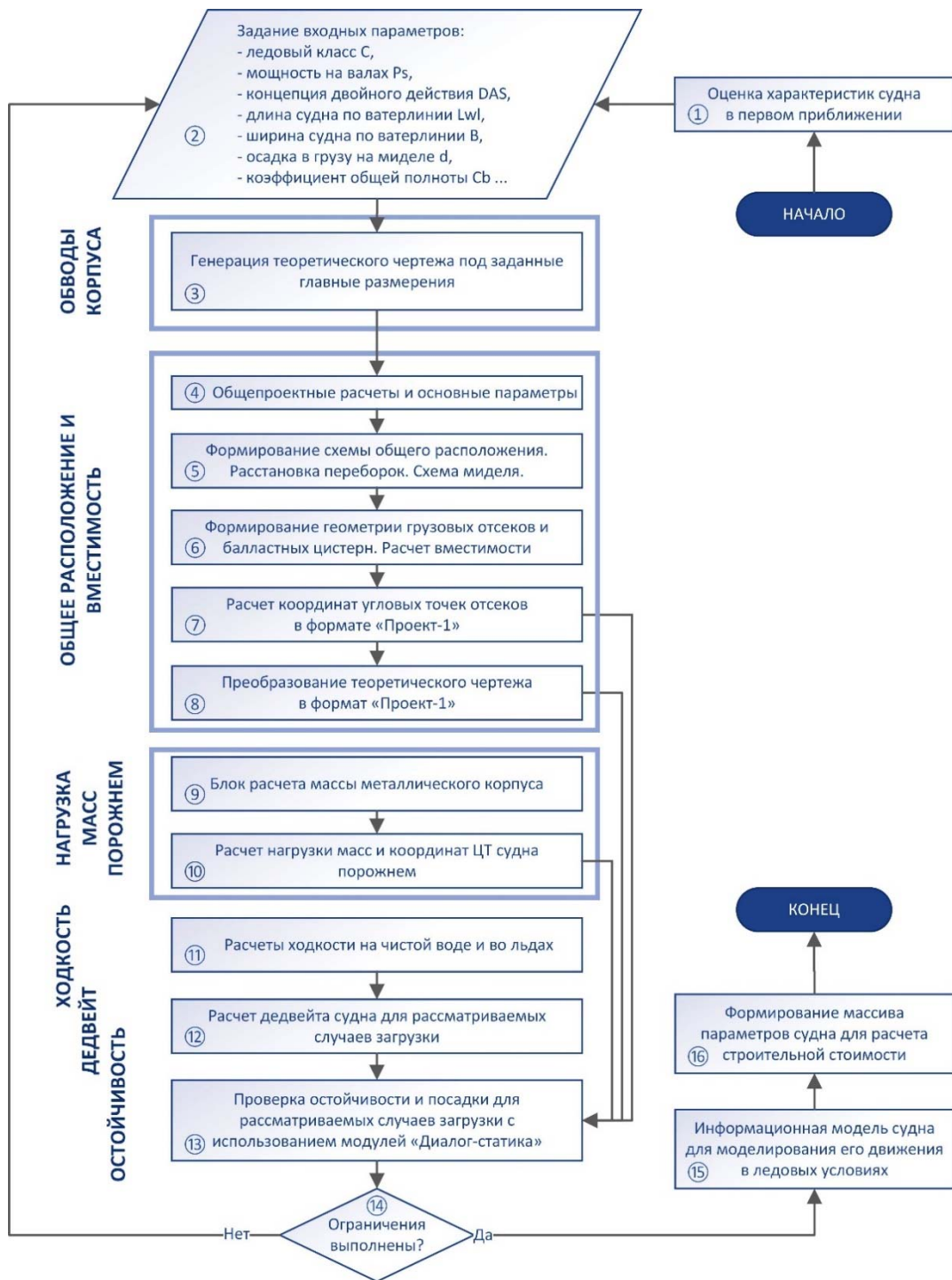


Рис. 1. Общая схема вычислительного процесса проектной модели

По завершении этих подготовительных расчетов на следующем, пятом (5), шаге вычислительного алгоритма формируется схема общего расположения судна. Производится определение длин отсеков, расстановка водонепроницаемых переборок, формируется двойной борт, двойное дно и другие элементы общего расположения. Расчеты в этом блоке выполняются с использованием регрессионных зависимостей, полученных по результатам анализа имеющихся статистических выборок и с учетом управляющих параметров общего расположения, заданных пользователем. Расстановка переборок производится в итерационном алгоритме, задачей которого является

обеспечение заданных объемов МО, ахтерпика, форпика и помещения ПУ при соблюдении ограничений на длины грузовых трюмов.

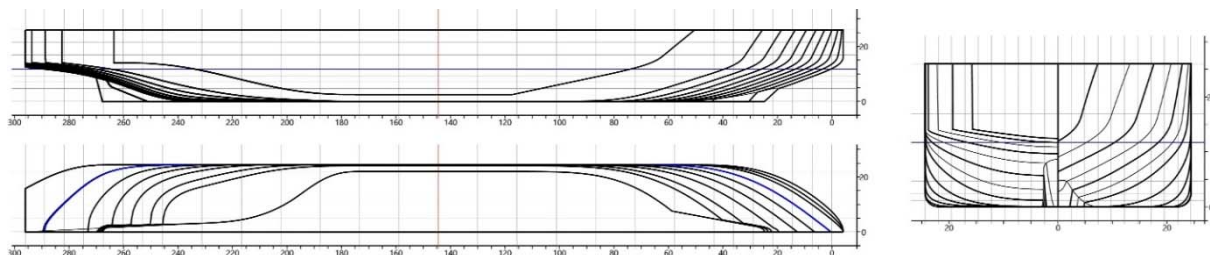


Рис. 2. Сгенерированная схема теоретического чертежа судна с ВРК

Известная схема общего расположения судна позволяет смоделировать геометрию грузовых и балластных танков и определить вместимость судна (блок ⑥). Геометрия отсеков строится на основе универсального алгоритма, позволяющего учитывать как технологические ограничения на формирование корпусных конструкций (отсутствие элементов с двойной кривизной), так и фактические обводы корпуса. В модели контейнерных судов формирование отсеков производится с учетом размеров контейнеров и сложной геометрии грузовых пространств в оконечностях судна. Примеры сгенерированных схем общего расположения одного из вариантов газовоза СПГ показаны 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 в поперечном и продольном разрезах принимается фиксированной для всех судов и соответствует традиционной компоновке существующих проектов. Размещение танка СПГ для судов с двухтопливной энергетической установкой может происходить либо на верхней палубе (танк типа С), либо внутри корпуса (мембранный танк). Блоки ⑦ и ⑧ являются объемными, однако носят технический характер и служат для формирования необходимых входных данных для расчета посадки и остойчивости судна с использованием расчетных библиотек из системы «Диалог-статика».

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 ⑨) на основе прямого проектирования конструкций по требованиям Правил РС к местной и общей прочности, а также при необходимости производится проверка прочности при скручивании (контейнерные суда). Оценка массы конструкций ледовых усилений производится на основе специализированной методики, изложенной в [10] и позволяющей учитывать форму корпуса судна. Массы прочих составляющих определяются в блоке ⑩ на основе статистических данных и расчета по укрупненным элементам. Для каждой составляющей нагрузки масс вычисляется положение центра тяжести, что позволяет далее определить положение центра тяжести всего судна порожнем. В составе нагрузки масс предусмотрен запас водоизмещения и остойчивости, а также учтены некоторые составляющие, которые не учитываются в расчете строительной стоимости (воздух в корпусе и постоянные жидкие грузы). Пример расчета нагрузки масс для судна типа «Кристоф де Маржери» приведен на рис. 4.

В следующем расчетном блоке ⑪ производятся расчеты ходкости на чистой воде и во льдах, которые включают:

- определение кривой буксировочного сопротивления судна на чистой воде на основе полуэмпирической методики [11];

- оценка коэффициентов взаимодействия винта с корпусом судна на основе эмпирических зависимостей;
- подбор гребного винта с использованием серии ледовых гребных винтов [12];
- вычисление тяги на швартовном режиме;
- расчет ледового сопротивления с использованием известных альтернативных полуэмпирических методов, определение расчетной ледопроеходимости судна.

Отметим, что подбор ледового гребного винта осуществляется исходя из режима движения судна на проектной скорости по чистой воде, что не в совсем соответствует характерному режиму работы судна ледового плавания. Тем не менее, поскольку принятая серия описывает ледовые винты, получаемые показатели тяги на швартовном режиме оказываются вполне удовлетворительными.

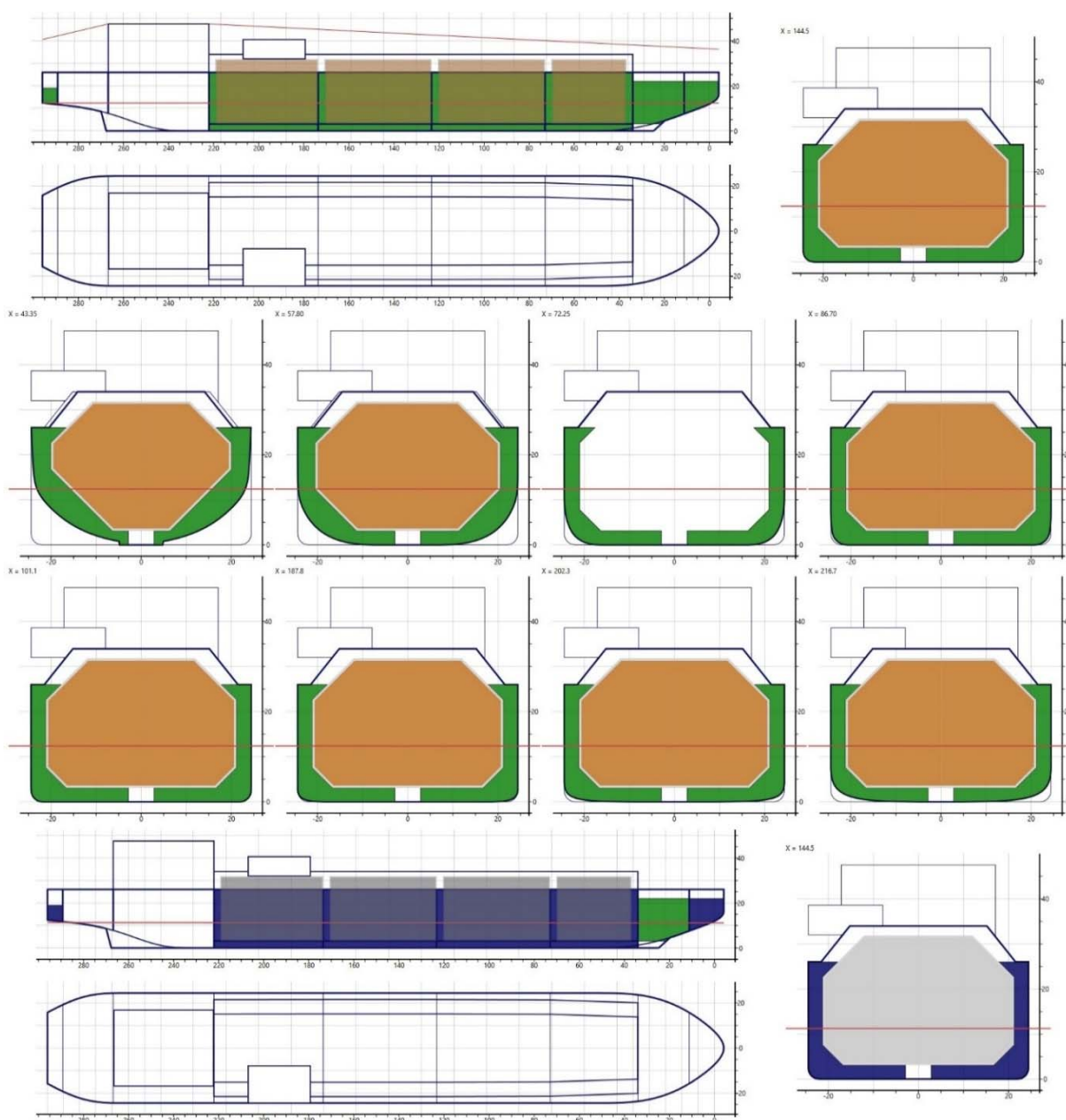


Рис. 3. Схема общего расположения газовоза СПГ с ледовым классом Arc7 при полной загрузке (сверху) и в балласте (снизу). В центре показаны промежуточные сечения корпуса

Наименование	Масса (т)	Абсцисса	Апplikата
Металлический корпус			
Основной металлический корпус без надстроек	26895	139.6	14.4
Конструкции надстроек	1999	282.0	37.0
Конструкции компрессорной	158	232.1	38.2
Ледовые усиления	5667	142.2	9.4
Оборудование корпуса			
Мембранная система хранения груза	3666	124.0	17.0
Грузовые системы и оборудование СПГ	707	132.1	34.5
Общесудовые системы	359	155.5	11.0
Якорное и швартовное устройства	359	77.6	20.3
Подруливающие устройства	17	20.3	8.0
Дельные вещи	814	109.5	28.3
Покрытия, изоляция и окраска	455	175.4	20.6
Прочее оборудование корпуса	191	231.7	30.3
Двигательный комплекс			
Двигатели типа 'Азипод'	1394	291.7	11.8
Дизель электрическая энергетическая установка на основе СОД			
Главные ДГ на раме с основным оборудованием	1025	237.3	15.9
Аварийный ДГ	0	246.3	31.5
Преобразователи частоты ГЭД	204	246.3	23.9
Трансформаторы ГЭД	225	246.3	23.9
ГРЩ, АРЩ и другие щиты	24	246.3	23.9
Силовой кабель	288	259.7	23.9
Крепления и дополнительные устройства передачи электроэнергии	394	215.0	26.5
Системы и оборудование ЭУ	1250	237.3	18.6
Дополнительные составляющие, не влияющие на строительную стоимость			
Воздух в корпусе	137	142.2	15.9
Запас водоизмещения и остойчивости	900	142.2	21.2
Постоянные жидкие грузы	500	190.5	6.4
Водоизмещение порожнем	47628	156.7	16.1

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

Информация о ходовых качествах судов, а также все прочие данные, полученные на данном этапе расчетов, позволяют выполнить расчет дедвейта (блок 12). Выделены четыре базовые составляющие дедвейта судна: перевозимый груз; запасы дизельных топлив (IFO, MDO); запасы топливного СПГ (для двухтопливных ЭУ); прочие составляющие дедвейта (экипаж, провизия, пресная вода и др.). Расчет массы запасов дизельных топлив для ДЭЭУ производится исходя из дальности плавания по чистой воде. В случае двухтопливной ДЭЭУ суммарная масса запасов топлив распределяется следующим образом: 60% приходится на дизельное топливо, а оставшиеся 40% – на топливный СПГ.

Расчет посадки и оценка параметров остойчивости судна производится в специализированном внешнем блоке 13, созданном на основе расчетных библиотек системы «Диалог-статика», имеющей сертификат Российского морского регистра судоходства (РС). Проверка остойчивости и расчет посадки выполняются для нескольких наиболее характерных состояний загрузки судна: полная загрузка (100% груза, 100% запасов); судно в балласте (без груза, 100% запасов); загрузка специфическим грузом (например, отличия по плотности или другой тип тары).

Проверка остойчивости является последним расчетным блоком, после которого проверяется условие окончания цикла формирования рассматриваемого варианта судна (элемент 14). Проверка касается следующих условий:

- должна обеспечиваться посадка судна в полном грузу на ровный киль или с приемлемым дифферентом на корму (0,2–0,5 м);
- должны полностью выполняться требования к остойчивости судна.

Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, то пользователь-проектант выполняет корректировку главных размерений корпуса судна, формы обводов

или других проектных параметров, и снова запускает расчет. Такие итерации производятся до тех пор, пока указанные критерии не будут выполнены.

Отметим, что единичный цикл выполнения всех расчетов от блока ④ до блока ⑬ включительно длится порядка 2 с, поэтому итерационный процесс может выполняться достаточно динамично.

После завершения итераций текущий вариант судна может быть сохранен в нескольких форматах, предназначенных для выполнения оценок строительной стоимости и моделирования движения судна в изменяющихся ветроволновых и ледовых условиях.

Верификация проектной модели. В настоящее время нами были разработаны проектные модели для судов четырех типов: 1) нефтяные танкеры; 2) газовозы СПГ мембранного типа; 3) универсальные сухогрузные суда; 4) ячеистые контейнеровозы. Важность оценки точности прогнозирования характеристик судов обусловлена тем, что одной из заявленных целей создания проектной модели является именно повышение адекватности проектных оценок.

В ходе разработки каждого расчетного блока проектной модели выполнялась его изолированная верификация. Так, обводы корпуса, получаемые на основе аналитической модели, сопоставлялись с обводами реальных судов ледового плавания [9]. Схемы общего расположения формировались на основе чертежей общего расположения существующих судов. Создание модели для расчета нагрузки масс сопровождалось сравнением постатейных значений с данными из разных источников. Выполнение верификация методов оценки посадки и остойчивости судна не столь актуально, поскольку используемые расчетные модули являются элементами программного обеспечения, имеющего сертификат РС. Тем не менее остается открытым вопрос о соответствии ряда интегральных показателей расчетной модели данным по конкретным судам, в особенности судам ледового плавания. Можно предположить, что изолированная верификация отдельных расчетных модулей не гарантирует точности общего результата. Поэтому необходимо выявить такие результирующие данные проектной модели, которые не были напрямую получены на основе регрессионных зависимостей и которые являются результатом взаимодействия различных блоков расчетной модели. В качестве таких интегральных показателей были выбраны следующие:

- летний дедвейт и грузовместимость;
- вместимость по балласту;
- механическая мощность ДЭЭУ;
- ледопробиваемость носом вперед и кормой вперед;
- достижимая скорость на чистой воде;
- водоизмещение судна порожнем;
- аппликата и абсцисса ЦТ судна порожнем;
- метацентрическая высота судна в грузу.

Например, водоизмещение и ЦТ судна порожнем являются результатом 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 многие другие факторы. Вместимость балластных цистерн наряду с грузовместимостью отражает то, насколько рационально используется пространство внутри корпуса судна для размещения груза и балласта. Значения ледопробиваемости и скорости хода иллюстрируют корректность расчета сопротивлений, подбора движителей и расчета тяги.

В рамках верификации рассматривалось пять танкеров («Енисей» класс Arc7; «Штурман Альбанов», класс Arc7; «Василий Динков», класс Arc6; «Кирилл Лавров», класс Arc6; «Mastera», класс Arc4), три завоза СПГ («Алексей Косыгин», класс Arc7; «Кристоф

де Маржери», класс Arc7; проект GTT номер G006, без ледового класса) и один универсальный сухогруз («Норильский Никель», класс Arc7). При выполнении процедуры верификации на вход расчетной модели поступали все известные данные о размерениях судов (длина, ширина, осадка, высота борта, мощность ЭУ, коэффициент полноты, состав кранового оборудования, ледовый класс, ширина двойного борта и другие), а недостающие параметры оценивались приближенно. Длины кормового и носового заострений корпуса принималась на основе общего расположения или оценивалась приближенно исходя из расчетного значения коэффициента общей полноты натуральных судов.

Результаты верификации приведены в сводной таблице, в которой данные, полученные на основе проектной модели, отмечены как «М», а фактические параметры указаны в строке «Пр».

Как видно, относительное стандартное отклонение по большинству параметров не превышает 2–5%. К таким параметрам относятся грузовместимость, дедвейт, вместимость по балласту, ледопроечность при движении кормой вперед, достижимая скорость на чистой воде, абсцисса ЦТ судна порожнем и, что немаловажно, водоизмещение судна порожнем. Последний параметр является одним из ключевых в предпроектном анализе вариантов судов и в формировании вариантных рядов.

Фактические и расчетные значения параметров судов

Параметр		«Енисей»	«Штурман Альбанов»	«Василий Динков»	«Кирилл Лавров»	«Mastera»	«Алексей Косыгин»	«Кристоф де Маржери»	Проект G006 фирмы GTT	«Норильский Никель»
Летний дедвейт, т	М	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	М	20 185	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
	%	-2.3%	1.3%	0.1%	-1.0%	0.0%	-0.1%	-0.1%	0.2%	2.2%
Вместимость по балласту (100%), м ³	М	12 156	25 876	36 823	36 260	43 541	68 138	72 090	56 904	8 060
	Пр	12 450	26 804	37 463	37 794	46 922	70 000	71 510	55 242	8 437
	%	-2.4%	-3.5%	-1.7%	-4.1%	-7.2%	-2.7%	0.8%	3.0%	-4.5%
Механическая мощность ЭУ, кВт	М	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%	13%	5.7%	5.7%		1.1%
Ледопроечность носом вперед, м	М	1.29	1.35	1.39	0.97		1.77	1.61		1.29
	Пр	1.5	1.4	1.7	1		1.7	1.5		1.5
	%	-14.0%	-3.6%	-18.0%	-3.0%		4.1%	7.3%		-14.0%
Ледопроечность кормой вперед, м	М	1.66	1.77	1.77	1.49	1	2.13	2.08		1.66
	Пр	1.65	1.8	1.7	1.6	1	2.1	2.1		1.65
	%	0.6%	-1.7%	4.1%	-6.9%	0.0%	1.4%	-1.0%		0.6%
Достижимая скорость на чистой воде, уз	М	17.4	18.8	17.9	16.7	15.8	20.3	20.1		17
	Пр	17.5	18.7	17.8	16	17	20.5	20.5		17.3
	%	-0.6%	0.5%	0.6%	4.4%	-7.1%	-1.0%	-2.0%		-1.7%
Масса судна порожнем, т	М	10 428	21 608	22 801	23 686	22 126	46 250	47 102	34 000	10 298
	Пр	10 544	21 350	20 819	25 030	21 726	46 000	47 087	32 395	10 798
	%	-1.1%	1.2%	9.5%	-5.4%	1.8%	0.5%	0.0%	5.0%	-4.6%
Абсцисса ЦТ судна порожнем, м	М	10.49		13.23	12.92		16.17		16.86	10.1
	Пр	8.93		13.03	12.25		16.95		16.6	9.66
	%	17.5%		1.5%	5.5%		-4.6%		1.6%	4.6%
Абсцисса ЦТ судна порожнем, м	М	96.1		140.0	140.6		165.8		151.8	100
	Пр	92		144	143.2		169.9		146.2	95
	%	4.4%		-2.8%	-1.8%		-2.4%		3.8%	5.2%
Метацентрическая высота судна в грузу, м	М	1.6			5.1		8		3.7	0.7
	Пр	2.8			6.3		8.05		3.3	1.1
	%	-44%			-20%		-0.6%		10.5%	-36%

Несколько бóльшие отклонения (6–11%) характерны для оценок механической мощности ЭУ. Еще бóльшие отклонения характерны для оценок ледопроеходимости при движении носом вперед (3–18%). Это вызвано чувствительностью этого параметра к деталям формы корпуса судна, которые не могли быть точно смоделированы в настоящей работе из-за отсутствия теоретических чертежей существующих судов. При этом значения тяги движителей на швартовном режиме, которые существенно влияют на ледопроеимость судна, моделируются с относительным отклонением не более 5%.

Наибольшие отклонения характерны для оценок аппликаты ЦТ судна порожнем и метацентрической высоты судна (до 40%). Отклонения по метацентрической высоте отчасти обусловлены эффектом низкой базы, когда относительно небольшие значения этого параметра приводят к росту относительных отклонений.

В целом на основе выполненной верификации можно признать, что созданные проектные модели обеспечивают хороший уровень точности прогнозирования проектных параметров судна. Это справедливо как для судов высокого ледового класса, так и для судов с относительно слабым ледовым классом.

Примеры практического использования. Приведем несколько примеров реальных практических работ, выполненных специалистами компании ООО «Бюро Гиперборея», в которых необходимые проектные решения по конфигурированию арктических МТС были найдены в рамках комплексной работы, включающей создание проектной модели судна, формирование вариантного ряда судов и исследование изучаемой транспортной системы на основе имитационной модели.

1. Модель транспортного обеспечения Баимского горнорудного месторождения. Согласно техническим требованиям, основным транспортным средством в рамках этого проекта должно стать универсальное арктическое сухогрузное судно (УСС) дедвейтом около 40 тыс. т, не имеющее прямых аналогов среди существующих судов. В прямых рейсах УСС должно обеспечивать перевозку рудного концентрата в бигбэгах, а в обратных рейсах – перевозку грузов снабжения в стандартных контейнерах. Достоверная оценка характеристик такого судна и его грузоместимости по рудному концентрату и генеральным грузам снабжения оказывается невозможной без выполнения достаточно детального предпроектного анализа. Причина в том, что удельная масса руды, перевозимой в бигбэгах, более чем в четыре раза превышает удельную массу контейнеров. Бигбэги перевозятся только в трюмах, а контейнеры также и на палубе УСС. Кроме этого, при полной загрузке грузами различного типа необходимо выполнить требования по остойчивости и удифферентовке судна, что накладывает определенные требования на общее расположение судна. Анализ указанных проектных неопределенностей требует учета всех аспектов, включенных в проектную модель судна на рис. 1. На основе такой модели были проанализированы различные проектные альтернативы. В частности, оказалось, что обеспечить приемлемое значение метацентрической высоты и соответственно показателей качки судна при полной загрузке судна бигбэгами удастся только за счет размещения части груза на твиндеке (рис. 5). Большая ширина судна приводит к необходимости установки проницаемой продольной переборки в трюме, которая служит опорой для твиндека. Это уменьшает контейнероместимость судна и увеличивает массу его корпуса. Был выполнен анализ зависимости массы корпуса и показателей остойчивости судна от доли бигбэгов, размещаемых на твиндеке, и определена оптимальная проектная загрузка. Также в рамках вариантного ряда УСС были рассмотрены суда различного ледового класса, имеющие традиционные валы или ВРК, а также различающиеся параметрами общего расположения. Полученные данные далее могут быть использованы для выполнения технико-экономического анализа МТС.

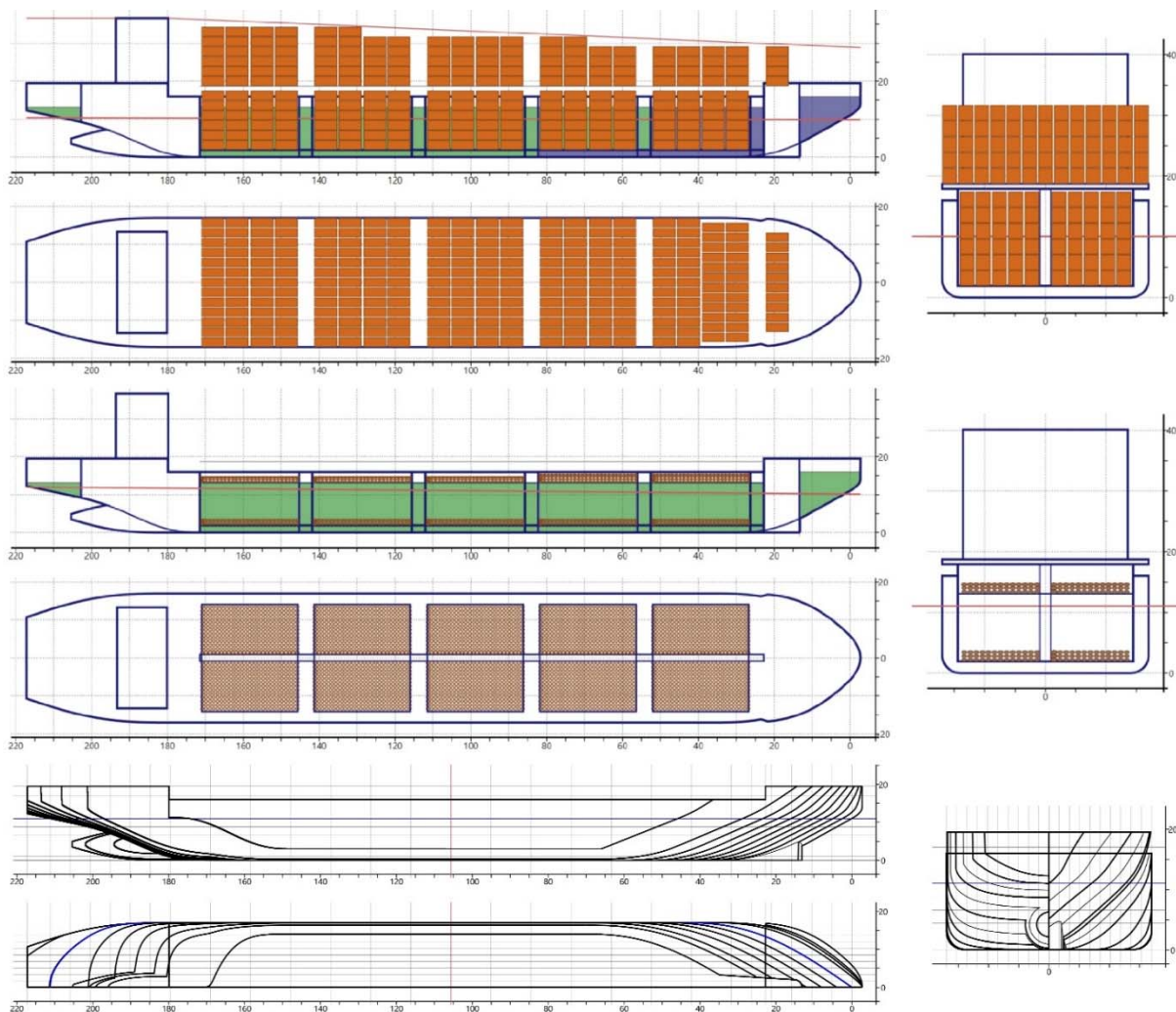


Рис. 5. Схемы размещения контейнеров (сверху) и бигбэгов (посередине) на УСС, а также схема его теоретического чертежа (снизу)

2. Модель транспортной системы транзитного контейнерного судоходства по трассам Северного морского пути (СМП) [13]. В рамках этой работы был построен вариантный ряд перспективных арктических контейнеровозов для круглогодичного транзитного плавания по СМП, которые в настоящее время не имеют прямых аналогов или близких прототипов. Для создания такого ряда использовалась проектная модель. Контейнеровместимость находилась в пределах 5000–6000 TEU, рассматривался ледовый класс Arc7 и Arc8, а также различные типы энергетической установки, движительного комплекса и другие параметры судна. После этого была построена имитационная модель, характерной особенностью которой является обеспечение регулярного движения судов на линиях и планирование ледокольного сопровождения с определением потребности в ледокольном флоте. Серия вычислительных экспериментов с многолетней имитацией рейсов этих судов на трассах СМП в рамках различных сценариев развития ледовой обстановки и стратегий работы ледокольного флота позволила выявить наиболее перспективный вариант арктического контейнеровоза. В дальнейшем было выполнено техническое проектирование перспективного судна с сохранением базовых проектных параметров, заложенных на концептуальной стадии (рис. 6). В ближайшем будущем ожидается серийное строительство судов этого типа. Этот кейс наглядно

демонстрирует необходимость компании–заказчика получить в рамках одной работы и рекомендуемые концептуальные проектные решения, и выполнить их сравнительный анализ в ходе имитационных экспериментов.

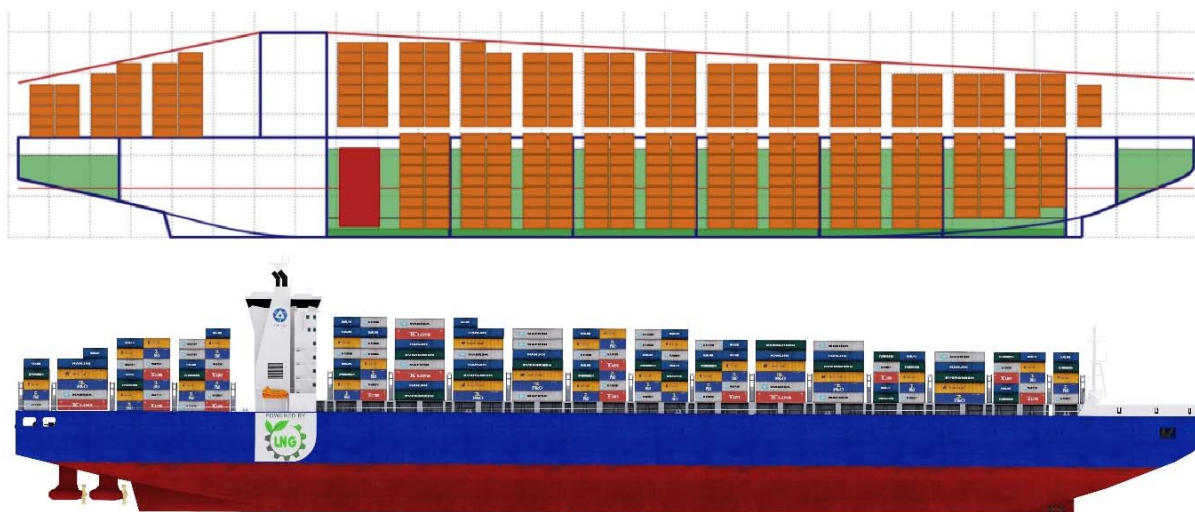


Рис. 6. Проектный облик арктического контейнеровоза для круглогодичной эксплуатации на СМП.

Заключение

Описанное программное решение – система концептуального проектирования судов ледового плавания – реализована в виде отдельного десктопного приложения, а ее интеграция с имитационной моделью МТС производится фактически через данные о характеристиках судов вариантного ряда. Такая интеграция является достаточно трудоемкой, но в настоящее время пока кажется нереалистичной возможность предложить некий универсальный метод для бесшовной интеграции средств автоматического проектирования на уровне концептуальных моделей (так называемых 1D-CAD/CAE систем) с функционалом имитационного моделирования. Такая интеграция может выполняться «вручную», поэтому, пожалуй, единственным возможным подходом здесь является создание под каждый проект мультидисциплинарной команды исследователей, обеспечивающей все необходимые компетенции как в предметной области проектирования судов, так и в области математического моделирования.

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»).

Литература

1. **Пашин В.М.** Оптимизация судов. Л.: Судостроение, 1983. 296 с.
2. **Watson D.G.M.** Practical ship design. Vol .1. Elsevier, 1998.
3. **Ашик В.В.** Проектирование судов. Л.: Судостроение, 1985. 320 с.
4. **Tsakalakis N., Vassalos D., Puisa R.** (2009). Goal-based ship subdivision and layout. STAB 2009. 687 – 696.
5. **Parrott A., Warshaw L.** Industry 4.0 and the digital twin: Manufacturing meets its match, Deloitte University Press, May 12, 2017.

6. **Таровик О.В., Топаж А.Г., Крестьянцев А.Б., Кондратенко А.А.** Моделирование систем арктического морского транспорта: основы междисциплинарного подхода и опыт практических работ // Арктика: экология и экономика. 2017. № 1 (25). С. 86–101.
7. **Рараниколау А.** Ship Design. Methodologies of Preliminary Design, Springer Verlag, 2014.
8. **Кондратенко А.А., Таровик О.В.** Проектирование арктических судов снабжения с учетом структуры грузопотока транспортной системы // Арктика: экология и экономика. 2019. №2(34). С. 80–96. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-80-96.
9. **Таровик О.В.** Аналитическая модель поверхности корпуса судна ледового плавания // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2015. № 86(370). С. 173–188.
10. **Таровик О.В.** Методика определения масс конструкций ледовых усилений транспортных судов на ранних стадиях проектирования: автореферат дисс. канд. техн. наук: 05.08.03; [Место защиты: Крылов. гос. науч. центр]. СПб., 2015. 23 с.
11. **Косоротов А.В.** Метод оценки буксировочного сопротивления современных ледоколов и судов ледового плавания на чистой воде // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2020. № 1(391). С. 29–41.
12. **Капранцев С.В., Полтавец П.А., Фролова И.Г.** Разработка серии гребных винтов фиксированного шага для судов ледового класса // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2012. № 4(353). С. 16–22.
13. Выполнены разработка комплексной имитационной модели транспортной системы СМТК и оптимизация основных характеристик судов по договору с компанией АО «ЦНИИМФ»: [Электронный ресурс]. URL: https://bureauhyperborea.ru/cniimf_rusatomcargo_smtk/ (дата обращения : 26.05.2023).