

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ АРКТИЧЕСКОГО МОРСКОГО ТРАНСПОРТА: ОСНОВЫ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО ПОДХОДА И ОПЫТ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

О. В. Таровик, А. Г. Топаж, А. Б. Крестьянцев, А. А. Кондратенко

ФГУП Крыловский государственный научный центр (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Рассмотрены основы междисциплинарного подхода к проектированию и анализу работы морских транспортных систем в Арктике. Описано реализующее данный подход программное решение, синтезирующее на базе объектно-ориентированной концепции такие направления, как геоинформационные системы, судостроительные дисциплины и динамические имитационные модели. Приведены примеры практических работ, демонстрирующих возможности междисциплинарного подхода, делается вывод о целесообразности его применения для комплексного исследования проектируемых арктических транспортных систем.

Ключевые слова: морские транспортные системы, имитационное моделирование флота, морская логистика, проектирование ледовых судов, определение состава флота, моделирование движения через лед, ледовый роутинг.

Статья поступила в редакцию 8 сентября 2016 г.

Введение

Ни один проект освоения ресурсов арктического шельфа не обходится без выполнения комплексного анализа работы морских транспортных систем (МТС), которые решают задачи транспортировки сырья, доставки грузов снабжения и вывоза отходов. Эффективность работы МТС во многом определяет экономические показатели проекта в целом, особенно в характерных для Арктики условиях слабо-развитой инфраструктуры. Доля МТС в суммарных затратах на обустройство арктических месторождений возрастает по мере увеличения дистанции морских перевозок и ледового класса судов и согласно ряду оценок доходит до 30—50% [8]. Это свидетельствует о важности задач по исследованию МТС, повышению их надежности и экономической эффективности.

Создание комплексной модели МТС является достаточно сложной с методической точки зрения задачей, так как требует применения подходов и методов из различных научных областей. В наиболее общем случае речь идет об определении характеристик флота и других объектов МТС, а также о дальнейшем детальном исследовании эффективности работы выбранной конфигурации системы с учетом входящих в ее состав судов, грузов, портов, платформ, судоходных маршрутов и других элементов.

Для выполнения подобного анализа с учетом всех наиболее влияющих факторов необходимо одновременное использование целого комплекса научных знаний из нескольких самостоятельных областей, каждая из которых имеет свой теоретический базис и методический аппарат. К таким областям относятся:

- моделирование работы сложных технических систем;
- проектирование судов и определение состава флота;
- логистическое планирование перевозок;
- моделирование природно-климатических и ледовых условий;
- расчеты ходкости судов во льдах и на чистой воде;
- системный анализ, алгоритмизация и программирование;
- моделирование процессов судовождения;
- технико-экономический анализ.

Вместе с тем ввиду того, что к созданию МТС имеют отношение специалисты разной ведомственной принадлежности, их интерпретация задачи проектирования МТС оказывается различной.

Например, среди специалистов-судостроителей принято рассматривать МТС в контексте решения задачи проектирования судна [7; 21; 26; 30],

когда на первый план выходят самые разнообразные аспекты проектирования при достаточно поверхностном учете прочих факторов и простом уровне алгоритмической проработки и программной реализации логистических аспектов системы. Отдельно в судостроительном направлении стоит ряд работ, выполненных в 1970—1980-х годах под руководством академика В. М. Пашина [14]. В них предложена концепция двухуровневой оптимизации судна, в которой верхний уровень оптимизации посвящен определению состава флота и основных характеристик судов для заданного региона на основе решения задачи математического программирования. Такой подход был адаптирован и к задаче проектирования МТС, работающих в ледовых условиях [9], однако применительно к проектированию транспортных систем с множеством зависимых от времени факторов он оказывается трудноприменимым [18]. Таким образом, можно обозначить общую для судостроительной сферы тенденцию: специалист-судостроитель рассматривает МТС с позиций проектирования судна.

Для специалистов в области морской логистики, работающих главным образом над моделированием работы судов обеспечения [22], контейнерных перевозок [31] и морских поставок сжиженного природного газа (СПГ) [20; 23], на первый план выходят вопросы создания оптимального плана грузоперевозок, определения необходимых площадей и объемов береговых хранилищ и подобные смежные задачи логистической направленности. При этом используются упрощенные модели движения судов. Различные аспекты проектирования судов и выбора оптимальных характеристик судна, как правило, не учитываются вовсе, т. е. рассматриваются только фиксированные конфигурации МТС.

Для специалистов финансово-экономического профиля характерно акцентирование внимания на экономических, управленческих и организационных аспектах создания МТС [6; 10; 19] с широким применением регрессионных и статистических оценок различных параметров. Специалисты в области программирования и создания информационных систем уделяют внимание главным образом компьютерному моделированию работы МТС и техническим аспектам программной разработки, используя самые простые модели движения судов на линии, которые, как правило, лишь косвенно учитывают природные условия [13].

Авторы убеждены, что для повышения качества создания арктических МТС необходим междисциплинарный подход, реализация которого возможна в интегрированном программном решении, фундаментальные основы и архитектура которого будут обеспечивать возможность охвата всех областей, важных для исследования таких систем. Описание опыта создания такого программного решения и его применения в ходе ряда практических работ приведено в настоящей статье.

Междисциплинарный подход к анализу работы МТС

В 2012 г. коллективом авторов [17] были начаты исследования по созданию универсального программного комплекса, предназначенного для проектирования и анализа работы морских транспортных систем, работающих в ледовых условиях. Основная идея данной работы заключается в интеграции в рамках единого программного обеспечения методов и подходов из различных предметных областей на основе следующих программных инструментов:

- объектно-ориентированного подхода (ООП);
- геоинформационных сред (ГИС);
- динамических имитационных моделей.

Объектно-ориентированный подход. Целесообразность применения ООП в исследовательском проектировании судов и открывающиеся в связи с этим возможности были сформулированы еще в 1990-х годах [4]. Однако практическое использование ООП в прикладных исследовательских приложениях, создаваемых специалистами-судостроителями, до сих пор сдерживается известным консерватизмом судостроительной отрасли и относительно низким уровнем компетенции в сфере разработки программных средств. При этом парадигма ООП идеально соответствует принципу рассмотрения судна как сложно организованной технической системы [5], а самой МТС — как системы более высокого иерархического уровня по отношению к судну [25]. Поэтому при создании программного решения для анализа МТС изначально была сделана ставка на широкое применение объектного подхода. Была выполнена комплексная работа по системному анализу, декомпозиции и формализации описаний элементов МТС, в результате чего были спроектированы концептуальная модель и программная архитектура разрабатываемого решения. Их полное описание выходит за рамки настоящей статьи, поэтому приведем в качестве примера только отдельный фрагмент — описание судна и перевозимых грузов в стандартной нотации UML [20] (рис. 1).

Логический класс «Судно» содержит большое количество атрибутов, которые описывают параметры, не зависящие от состояния загрузки. Наряду с этим в его составе присутствуют структуры сложного типа («Группы винтов» и «Состояния загрузки») в количестве одной или более. В качестве параметров этих структур выступают соответствующие характеристики винтов и характеристики судна, изменяющиеся в зависимости от степени его загрузки (водоизмещение, буксировочное сопротивление и пр.). Судно может содержать произвольное количество грузовых пространств и средств грузообработки, производительность которых описывается коллекцией экземпляров специального класса «Параметры грузообработки». В этом классе определяется, что данный «Тип груза» погружается или выгружается из данного грузового пространства с заданной интенсивностью. Грузовые пространства делятся на

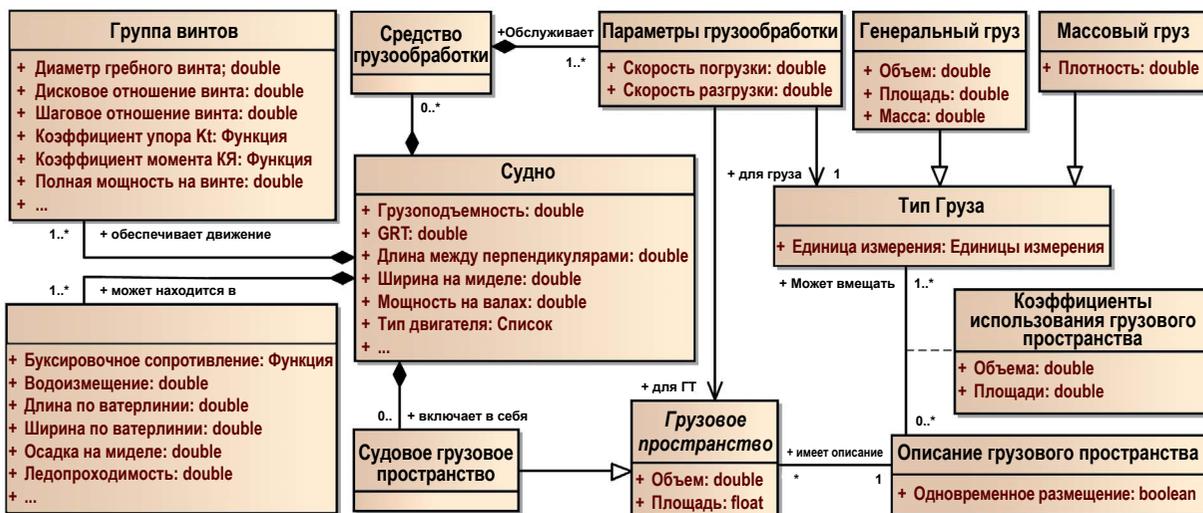


Рис. 1. Диаграмма классов объектной модели судна и грузов в стандартной нотации UML (фрагмент общей модели)

судовые и береговые (не показаны на рис. 1), общие характеристики и поведение которых инкапсулированы в абстрактном классе «Грузовое пространство». Его важнейшей характеристикой является «Описание грузового пространства», содержащее коэффициенты использования пространства для каждого типа груза, а также сведения о том, может ли в данном грузовом пространстве содержаться более одного груза. Логических типов груза выделено два: генеральные грузы (грузовые единицы характеризуются объемом, площадью и массой) и массовые грузы (характеризуются плотностью). Массовый груз по этой классификации включает в себя и наливные грузы. Представленная модель позволяет выполнять описание актуальных с позиций анализа МТС аспектов судна и его грузовых пространств. Причем, как видно, при рассмотрении судна в качестве элемента МТС основное внимание уделено его грузовым пространствам, состояниям загрузки и ходовым качествам, так как именно эти параметры характеризуют судно как функциональную сущность в составе транспортной системы.

В качестве объектов представляются не только суда, но также порты, платформы и другие элементы МТС. Каждый объект имеет внутреннюю структуру и характеризуется определенным набором статических параметров и фазовых переменных, описывающих его текущее состояние. Так, в структуре порта помимо грузовых пространств и средств грузопереработки описаны рейды, причалы, внутрипортовые маршруты, окна погоды и другие элементы.

Можно резюмировать, что применение ООП наилучшим образом соответствует системному подходу и дает принципиальную возможность моделировать сложную структуру МТС и интегрировать различные подсистемы в составе сложных систем.

Геоинформационные среды. ГИС-среда, в которой моделируется движение судов, содержит

данные четырех типов, которые хранятся в формате shape-файлов, сеточных grid-областей или в формате tile-слоев. К этим данным относятся:

- слои, формирующие географическое пространство для навигации судов;
- слои и базы данных природных условий, необходимые для расчета параметров движения судов;
- зоны с особыми логическими ограничениями или экономическими условиями;
- информационные картографические слои.

Описание географического пространства для навигации (рис. 2) содержит: рейды портов, береговую черту, глубины морей (базы GEBCO и ETOPO), стандартные неуклоняемые маршруты движения (фарватеры, внутривортовые маршруты) и слой «закрытых» навигационных пространств. Последний слой ограничивает участки моря с глубинами менее 20 м, а также сглаживает неровности контура береговой черты в целях упрощения автоматической навигации судов. Движение судов вне закрытых пространств не регламентируется заранее заданными маршрутами, в то время как в их пределах движение возможно только по фиксированным предопределенным траекториям.

Слои природных условий включают регионы и связанные с ними базы данных, содержащие описание стохастических параметров ветра и волн, условий видимости, параметров льда и ледовых сжатий. Задание и хранение данных по ледовым условиям производится с помощью сеточного подхода (grid-формат), при котором вся акватория замерзающих морей России покрывается широтно-долготной сеткой определенного разрешения (для арктических морей принят шаг 0,25°), в каждой ячейке которой определены параметры льда для легких, средних, тяжелых и экстремально тяжелых ледовых условий отдельно для каждого календарного месяца. В качестве параметров льда используются такие

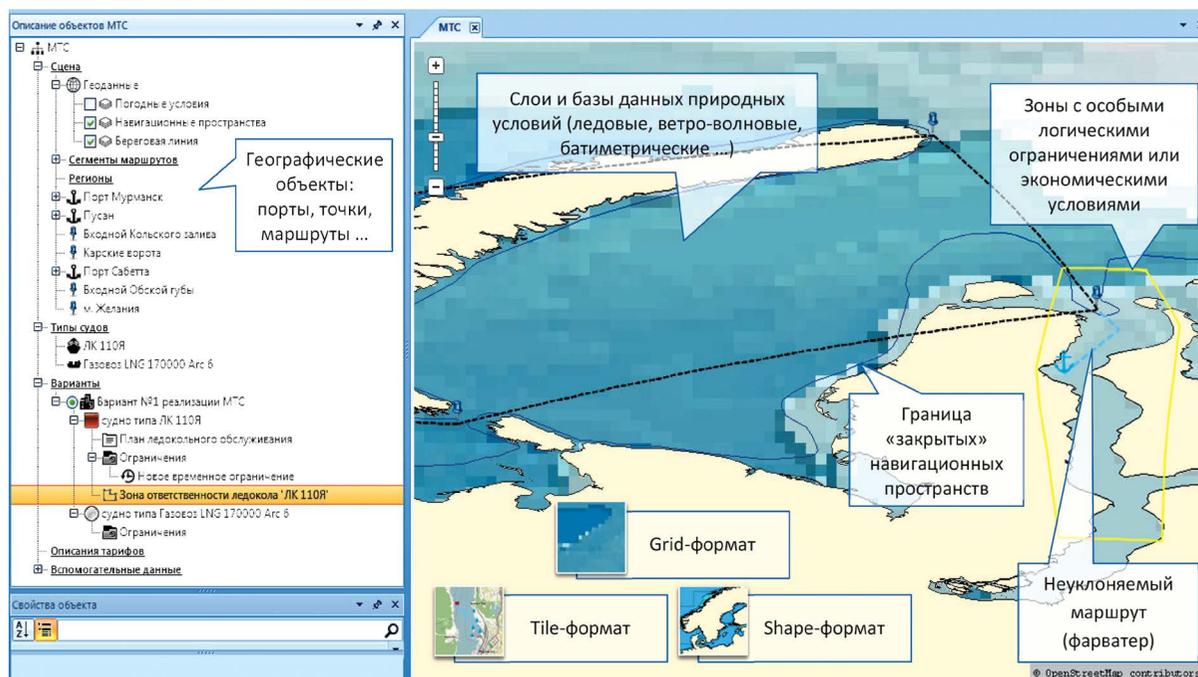


Рис. 2. Основные геоинформационные данные, используемые при моделировании МТС

характеристики, как сплоченность (общая и частная), возрастной состав, форма льда, торосистость, заснеженность, разрушенность, вероятностные характеристики ледовых сжатий и разрывов сплошности льда, а также его прочностные характеристики — все параметры, которые необходимы для расчета скорости движения судов и расходов топлива. Интегральная характеристика тяжести ледовых условий показана на рис. 2 цветом: чем тяжелее лед, тем более светлый оттенок имеет соответствующий квадрат сеточной области.

Следует отметить, что для описания ледовых условий при исследовании МТС отечественными специалистами традиционно применяется другой подход — маршрутное представление условий для конкретных морских трасс. Такое представление, несмотря на относительную простоту ввода и контроля данных, накладывает очевидное ограничение по расположению портов и маршрутам движения судов; именно поэтому в программном комплексе реализован альтернативный сеточный подход, обеспечивающий возможность исследования МТС с произвольным расположением портов. Особенности использования сеточного представления ледовых условий в практических расчетах описаны далее.

Слой ветро-волновых условий (shape-формат) содержит статистические данные о параметрах ветра и волнения во всех регионах Мирового океана и учитывается при расчете параметров движения судов наряду с глубинами моря и условиями видимости.

При практическом моделировании МТС часто возникает необходимость оперировать специфической

информацией, имеющей геоинформационную привязку. Для этого была реализована технология создания географических регионов, для которых могут быть заданы различные правила исчисления налогов и сборов (в зависимости от характеристик судна, времени года и параметров груза), введены ограничения для нормирования выбросов, установлены требования по ограничению сроков навигации и т. п. Особые регионы этого типа используются, в частности, для описания границ районов ответственности ледоколов.

Помимо данных, которые непосредственно используются для выполнения различных расчетов, несомненную пользу на этапе подготовки исходной информации и моделирования МТС приносят слои информационной поддержки. На них отображается положение и названия городов, проливов, фарватеров, железных дорог и подобных объектов. Для отображения таких слоев используются tile-формат и интернет-сервис OpenStreetMap.

В целом можно сказать, что использование ГИС-технологий при описании МТС и моделировании ее работы позволяет не только снизить затраты времени на подготовку данных, но и обеспечивает практическую возможность реализации логики движения и взаимодействия судов, которая неразрывно связана с геоинформационным пространством.

Динамические имитационные модели. Для анализа МТС и проектирования судов в их составе традиционно используются методы, перечисленные ниже в порядке увеличения вычислительной сложности (в скобках указано преимущественное использование методов) [11]:

- экспертно-аналитический анализ (определение состава флота и других параметров МТС на основе аналитических формул и экспертных оценок);
- теория массового обслуживания (моделирование работы судов в портах и шлюзах, описание работы флота обеспечения платформ);
- теория графов и комбинаторная оптимизация (определение оптимальной последовательности обхода портов, составление расписаний движения);
- линейное или нелинейное математическое программирование (определение оптимальных характеристик флота, обеспечивающего заданный грузопоток при наличии в системе множества портов);
- дискретно-событийное или агентное имитационное моделирование (комплексный анализ и проектирование МТС).

Не останавливаясь подробно на деталях этих подходов, отметим, что для сравнения различных вариантов флота и оптимизации его состава (т. е. для решения «проектной» задачи) могут использоваться практически все указанные методы с учетом ограничений, налагаемых организацией работы флота и особенностями судов. Необходимым условием является высокое быстродействие расчетных моделей, которое должно быть достаточным для выполнения массовых сопоставительных и оптимизационных расчетов. Очевидно, что детализация таких расчетных моделей «проектного» типа в части описания движения судов, моделирования природных процессов, составления расписаний и т. п. должна быть небольшой. Для получения же наиболее точных количественных оценок и наглядной визуализации работы МТС, состав и характеристики которой фиксированы (т. е. когда быстродействие модели не имеет решающего значения), наиболее перспективным представляется агентное имитационное моделирование [3]. С его помощью можно получить адекватную и непротиворечивую эксплуатационную модель морских транспортно-технологических систем, действующих по нелинейным эксплуатационным схемам и выполняющих несколько функций или имеющих сложные логические связи между элементами (суда ледового плавания и ледоколы, суда обеспечения нефтегазодобывающей отрасли, суда технического флота и др.). Только агентная модель, совпадающая по своей идеологии с системным подходом и принципами ООП, поддерживает реализацию «междисциплинарной» модели МТС, которая обладает широкими возможностями и одновременно достаточно высокой вычислительной сложностью.

Исходя из этих соображений, в структуре программного решения для исследования МТС отдельно выделены расчетные модели МТС, служащие для определения состава флота и оптимизации характеристик судов, и имитационные агентные модели для детального исследования фиксированной конфигурации МТС. Отметим, что согласно опыту авторов наибольший практический интерес в современных условиях представляет именно вторая задача. Это обусловлено тем, что среди заказчиков

и судостроителей-проектантов в последние годы, к сожалению, принято не уделять достаточного внимания задаче предпроектной оптимизации характеристик судов в составе МТС. А вот необходимость выполнения исследований по анализу работы МТС, характеристики которых выбраны на экспертной основе, встречается достаточно часто.

Итак, комплексная агентная имитационная модель МТС (рис. 3), созданная коллективом авторов [17], реализует следующий принцип исследования МТС: суда представляются как самостоятельные сложные объекты, движущиеся и взаимодействующие в геоинформационной среде под управлением логических блоков динамической имитационной модели. Для создания имитационной модели используется среда AnyLogic, в которой моделируются движение судов, динамика наполнения хранилищ, окна погоды работы портов и множество других процессов, происходящих в МТС. История изменения любого параметра работы модели записывается в электронном журнале операций («логе») и может быть проанализирована в рамках стандартных процедур постпроцессинга. Для получения и статистического анализа специфических показателей вероятностного характера, таких, например, как обеспеченность уровня наполнения хранилищ, используется многократный запуск имитационной модели.

Движение судов моделируется в стохастических природных условиях, а скорости хода и расходы топлива определяются при помощи специального программного модуля «Механик» [17]. В этом модуле сконцентрированы методы оценки ходовых качеств судов в природных условиях всех типов включая движение по тихой воде, движение в условиях ветра и волнения с учетом принудительного снижения скорости, самостоятельное движение в ледовых условиях с учетом ограничений по прочности корпуса, движение в караване за ледоколом и в смерзающем ледовом канале. Производится учет влияния ограниченной глубины, обрастания корпуса (при движении по чистой воде) и шероховатости обшивки (при движении через лед). Функционал модуля «Механик» позволяет моделировать многовалевые суда, а также учитывать специфику энергетических установок с различными типами передачи мощности на гребные валы. Расчеты параметров движения судна производятся для любых достижимых случаев загрузки пропульсивного комплекса при произвольном сочетании природных условий. Другими словами, модуль «Механик» является универсальным расчетным инструментом, который инкапсулирует различные методы расчета ходкости судов, причем при его создании использованы как существующие методы, так и оригинальные авторские методики.

В составе агентной имитационной модели МТС содержатся также локальные подмодели, которые описывают отдельные процессы динамической природы. Типичным примером такой подмодели является модель зарастания ледового канала в припае. Каждое судно, проходя по каналу, меняет его

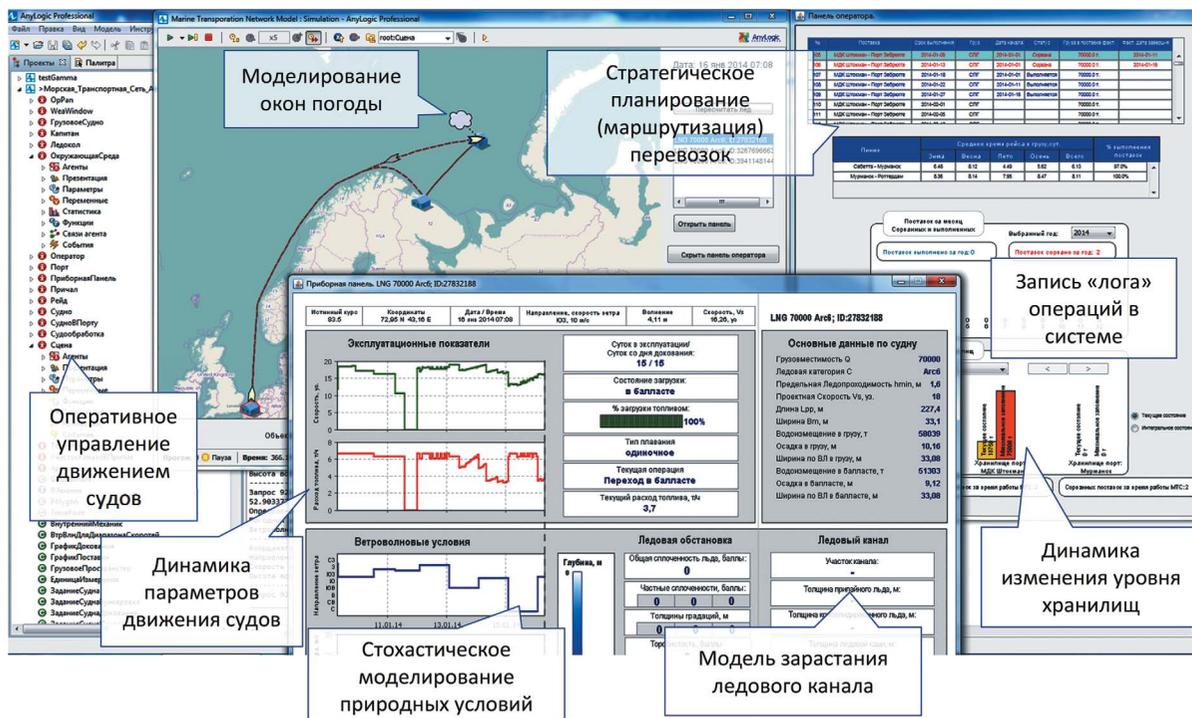


Рис. 3. Агентная имитационная модель МТС и основные моделируемые процессы

текущие характеристики, которые, в свою очередь, определяют скорость движения как этого, так и последующих судов. Поэтому влияние ледового канала может быть достоверно оценено только в рамках вычислительного эксперимента со всей имитационной моделью. В зависимости от решаемой задачи в программном комплексе могут быть реализованы другие предметно-ориентированные подмодели (например, модель технологических процессов на буровой установке).

В агентной модели предусмотрены, а для решения ряда конкретных задач уже реализованы блоки управления работой МТС на стратегическом (плановом) и тактическом (оперативном) иерархических уровнях.

Стратегическое планирование перевозок осуществляется при помощи внешних расчетных блоков и служит для составления графика поставок в соответствии с заданным грузопотоком, назначения конкретных экземпляров судов на конкретные рейсы или нетранспортные технологические операции, а также для управления ледокольным сопровождением судов, отправки судов на докование и т. п. Стратегический план может быть оперативно изменен в случае невозможности его выполнения в какой-либо момент работы имитационной модели. Подходы к решению задачи стратегического планирования в МТС более подробно освещены в [2]. Здесь лишь отметим, что при рассмотрении МТС в «общем» случае с характерными, но трудно формализуемыми специфическими особенностями (множество типов судов и типов грузов, наличие перевалочных баз, нестационарность входных условий, необходимость учета

дополнительного ресурса в виде ледоколов и т. д.), существующие строгие комбинаторные алгоритмы решения транспортной задачи оказываются практически неприменимыми. Поэтому задача создания универсального стратегического планировщика МТС авторами пока отложена, а основное внимание уделено решениям с применением эвристических и полуввристических методов для частных случаев, определяемых конкретными практическими задачами исследования МТС.

Тактическое или оперативное планирование служит для исполнения стратегического плана в конкретных обстоятельствах, т. е. с учетом текущего состояния объектов МТС (задержки прибытия судов, неблагоприятные окна погоды, фактические уровни заполнения хранилищ и т. п.). Инструментами решения задач тактического планирования является изменение скорости хода судов, корректировка очередности подходов судов к причалам, уточнение объемов и сроков ледокольной поддержки и т. п. Согласно пониманию авторами этой задачи тактический планировщик должен разрабатываться отдельно для каждой конкретной МТС с учетом множества ее локальных особенностей и детализированности модели в целом. При этом могут применяться как формальные оптимизационные алгоритмы, так и формализованные реализации экспертных подходов.

Таким образом, можно говорить о том, что при создании единого программного решения для исследования МТС агентная имитационная модель является центром междисциплинарной интеграции и потенциально позволяет исследовать все без преувеличения аспекты работы системы.

Структура программного решения

Структура программного решения включает четыре основных логических блока [1; 17], тесно интегрированные между собой (рис. 4). Ввод и редактирование всех объектов исследуемой МТС производится в управляющей оболочке — «Конструкторе сценариев». В блоке «Маршрутные затраты» определяется набор статистических данных о параметрах движения судов исследуемой МТС, которые необходимы для дальнейшего сопоставительного анализа различных конфигураций флота и планирования его работы. Выбор наиболее рационального состава флота МТС на основе специализированных моделей производится в «Оптимизационном блоке». Использование этих модулей позволяет сформировать некую конкретную опорную конфигурацию исследуемой системы — «Вариант МТС», который содержит однозначное описание всех объектов и может быть далее исследован в рамках компьютерных экспериментов с агентной имитационной моделью. Вариант МТС может содержать любую произвольную конфигурацию МТС, но в случае использования «Оптимизационного блока» эта конфигурация будет удовлетворять некоему технико-экономическому критерию оптимальности.

Необходимо отметить, что использование двух моделей разного уровня детализации для оптимизации состава флота и имитационного моделирования работы одной и той же МТС порождает проблему согласования моделей. Другими словами, конфигурация МТС, полученная в «Оптимизационном блоке» должна оказаться работоспособной в «Имитационной модели», детализация которой существенно выше. Решение этой проблемы сводится к тому, что оптимизационная модель для повышения быстродействия может содержать более простые описания судов, грузов, природных условий и других параметров МТС, но не должна искажать ключевые аспекты работы транспортной системы. Практика показывает, что практический учет этого требования возможен даже для достаточно специфических задач. Например, в работе [18] описана дискретно-событийная оптимизационная модель определения числа и основных характеристик судов-газовозов СПГ, учитывающая важное для работы таких судов требование регулярности поставок СПГ в конечные порты.

Опыт выполнения практических работ

Как показывает опыт авторов, конкретные задачи исследования МТС почти всегда являются нетипичными и в каждом частном случае для создания адекватной модели МТС требуется углубление в различные научные области. За период 2014—2016 гг. с использованием разработанного программного решения был выполнен ряд проектов различного масштаба, краткое описание которых приведено далее.

1. Выполнено исследование работы мелкосидящих ледоколов проекта 22740 в Азовском и Каспийском

морях (по заказу Федерального агентства морского и речного транспорта). Цель работы состояла в определении требуемого количества ледоколов для обеспечения перспективных грузопотоков, а также в оценке технико-экономических показателей работы ледоколов при проводке судов. С помощью модуля «Механик» были выполнены расчеты времени движения караванов, состоящих из двадцати судов «река-море» с ледовыми классами Ice1—Ice3, под проводкой двух ледоколов в средних и тяжелых ледовых условиях (рис. 5). Определены расходы топлива ледоколов.

Обоснование необходимого числа ледоколов для перспективных грузопотоков выполнено экспертно-аналитическим путем посредством составления «бюджета времени» рейсов. На основании полученных результатов было принято решение о снижении требований к автономности ледоколов по топливу, что существенно уменьшило капитальные затраты по судам и эксплуатационные издержки системы в целом.

2. Выполнена предпроектная оценка характеристик МТС, обеспечивающей вывоз углеводородов Ванкорского региона (Карское море) в западном и восточном направлениях, включая круглогодичное движение по трассам Северного морского пути (по заказу ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть»). В работе определены проектные характеристики и технико-эксплуатационные показатели (время рейса, расходы топлива) типоразмерного ряда судов (танкеры, газовозы LNG и LPG) с ледовыми классами Arc7 и Arc8. На основе исследований выполнены технико-экономические расчеты в обоснование целесообразности дальнейших изысканий.

3. Разработана модель эксплуатации атомного ледокола-лидера мощностью 120 МВт (по заказу Минпромторга России). Цель исследования — оценка эксплуатационных показателей работы атомного ледокола-лидера при проводке судов в восточном и западном секторах Арктики. Для этого были выполнены оценки объемов перевозок по СМП нефти, LNG и LPG и транзитных грузов для оптимистичного, умеренного и пессимистичного сценариев развития. Затем были определены характеристики арктических нефтяных танкеров и газовозов, после чего создана имитационная модель работы ледокола-лидера и получена оценка грузопотоков, обеспечиваемых одним и двумя ледоколами в ледовых условиях различной степени тяжести. Помимо этого получено распределение мощности энергетической установки ледокола (рис. 6) в течение года и определена продолжительность работы на одной загрузке ядерного топлива.

Одной из важных практических задач, решенных в рамках исследования работы ледокола-лидера, была проблема выбора оптимального маршрута движения во льдах (роутинга) [26; 23]. Известно, что современные арктические суда практически не ходят во льдах прямыми курсами, а максимальным образом



Рис. 4. Структурные блоки программного решения для исследования МТС

используют имеющиеся полыньи, полыньи и районы более слабого льда, значительно отклоняясь от стандартных маршрутов. На базе Арктического и антарктического научно-исследовательского института функционирует специальный сервис [15], обеспечивающий спутниковую радарную ледовую разведку, по результатам которой судоводителю ежедневно предоставляется наиболее благоприятный маршрут движения через лед. Поэтому ледовые условия в регионе в целом могут быть тяжелее условий на маршруте движения судна, который подлежит определению. Помимо проблемы выбора оптимального пути следования существует также задача обоснования необходимых объемов ледокольной проводки судов. В ряде случаев суда могут как самостоятельно пробиваться через лед, так и воспользоваться услугами ледокольной проводки, увеличивая скорость движения и экономя топливо, но одновременно неся дополнительные затраты на фрахт ледокола. Очевидно, что существует некоторый экономически оправданный объем ледокольного сопровождения, при котором условные затраты на прохождение ледового участка будут минимальными.

Для решения этих задач был применен алгоритм Дейкстры (Dijkstra), позволяющий найти оптимальный путь на ориентированном графе. Иллюстрация к постановке оптимизационной задачи представлена на рис. 7. Все пространство между начальной и конечной точками сегмента маршрута представляется в виде регулярной сеточной области (с учетом «закрытых» навигационных пространств), для каждого

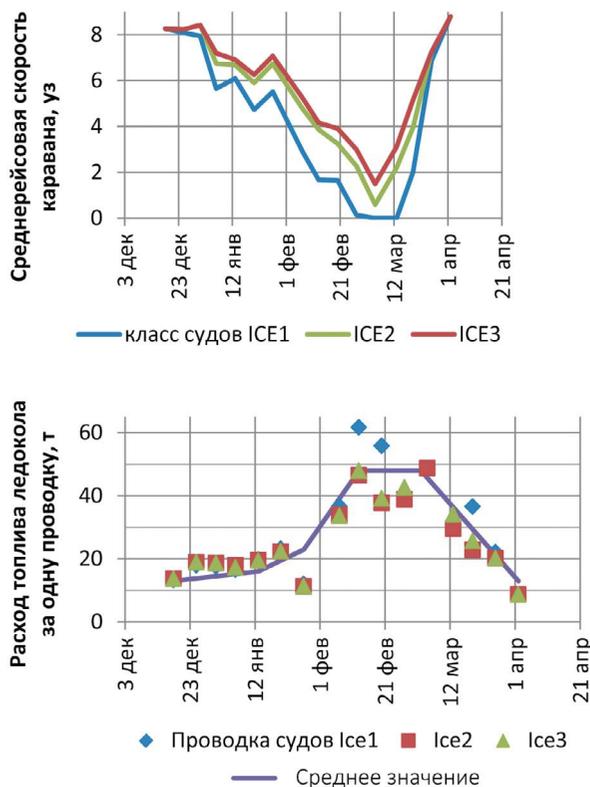


Рис. 5. Параметры проводки каравана судов различного ледового класса в Азовском море (тяжелые ледовые условия) мелкосидящим ледоколом проекта 22740

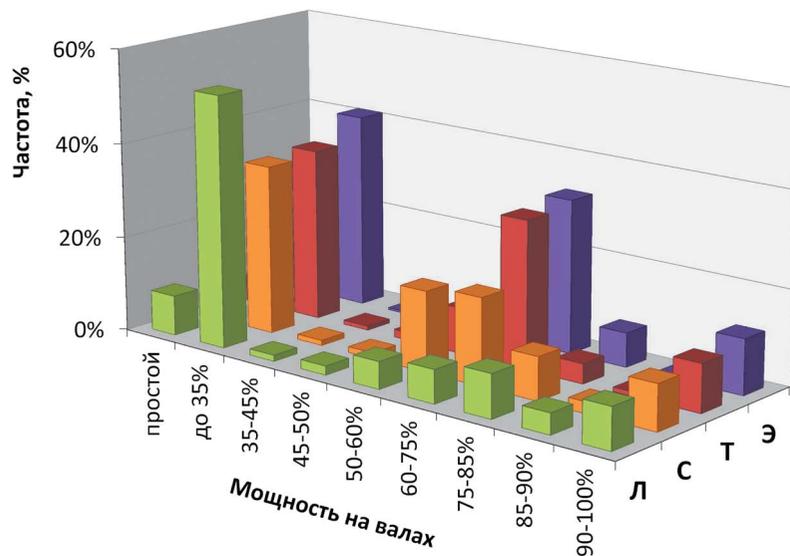


Рис. 6. Распределение мощности энергетической установки ледокола-лидера в течение типового года в легких (Л), средних (С), тяжелых (Т) и экстремально тяжелых (Э) ледовых условиях

ребра которой определяется условная цена прохождения, равная произведению фрахтовой ставки судна и длительности прохождения данного ребра, рассчитанной с помощью блока «Механик». Помимо этого вычисляется также цена прохождения каждого ребра для случая движения судна с ледоколом, которая учитывает сумму фрахтовых ставок судна и ледокола и скорость движения каравана. В результате образуется характерный «двухслойный» граф, на одном слое которого определены параметры самостоятельного движения судна, а на другом — движения с ледоколом. Переход с верхнего слоя на нижний возможен в любой точке графа; цена этого перехода определяется как произведение условного времени ожидания ледокола и его фрахтовой ставки. Таким образом, размерность каждого ребра — «руб.ч», а оптимизация маршрута производится посредством минимизации этого критерия на графе. Примеры решения задач ледового роутинга приведены на рис. 8. Время вычислений на стандартном персональном компьютере для приведенных примеров не превышает одной секунды.

Приведенная постановка задачи роутинга позволяет не только определять оптимальный путь движения судов во льдах, но и оптимизировать объемы ледокольной проводки. Действительно, если условная стоимость привлечения ледокола мала, то судно будет стремиться всегда идти в его сопровождении, если же она велика, то судно будет запрашивать ледокол только в тех районах, где не может двигаться самостоятельно (рис. 8). Указанная технология использовалась для обоснования объемов ледокольной поддержки судов различного ледового класса ледоколом-лидером.

4. Выполнен анализ логистической схемы работы челночных танкеров на морской ледостойкой стационарной платформе «Приразломная» (по заказу

ООО «Газпром нефть шельф»). Проведен численный имитационный эксперимент по оценке скорости грузообработки на основании натурной статистики по подходам-отходам судов, а также определены окна погоды для выполнения грузовых операций по допустимым направлениям ветра и дрейфа льда.

5. Разработана концепция транспортной системы для арктического плавучего завода СПГ (по заказу Минпромторга России). В рамках работы были определены состав и характеристики флота судов-газовозов, разработана модель грузоопераций в порту, учитывающая влияние окон погоды на динамику наполнения хранилищ, число подходов-отходов судов и другие показатели МТС. Показано, что для принятой

технологии отгрузки СПГ и удержания плавучего завода в точке добычи влияние окон погоды, определяемых ветро-волновыми условиями и дрейфом льда, на пиковые уровни наполнения хранилища достаточно невелико — около 10% суммарной вместимости. Проанализировано влияние на динамику показателей МТС такого аварийного фактора, как выход из строя одного судна-газовоза. Работа является основой для дальнейшего проектирования плавучего завода СПГ и обеспечивающих его работу транспортных систем.

6. Создана имитационная модель работы арктических танкеров Новопортовского месторождения на линии от мыса Каменный (Обская губа) до порта Мурманск в условиях смерзающегося ледового канала в припае (по заказу ООО «Газпром нефть Новый Порт»). Особенностью данного исследования являлось определяющее влияние протяженного ледового канала на все элементы МТС: танкеры, береговое хранилище, дежурный ледокол. Разработка модели ледового канала [15] и интеграция ее в основную имитационную модель позволили решить ряд важных практических задач:

- моделирование динамики наполнения берегового резервуарного парка и обоснование его проектной вместимости (рис. 9);
- определение объемов и сроков необходимой ледокольной поддержки танкеров в тяжелых и экстремально тяжелых условиях;
- определение необходимого числа ледовых каналов в припае и ориентировочных дат их прокладки в различных ледовых условиях;
- определение показателей работы транспортной системы по временной схеме, когда основные танкеры еще не введены в строй, а перевозки осуществляются с помощью существующих судов малого дедвейта и слабого ледового класса.

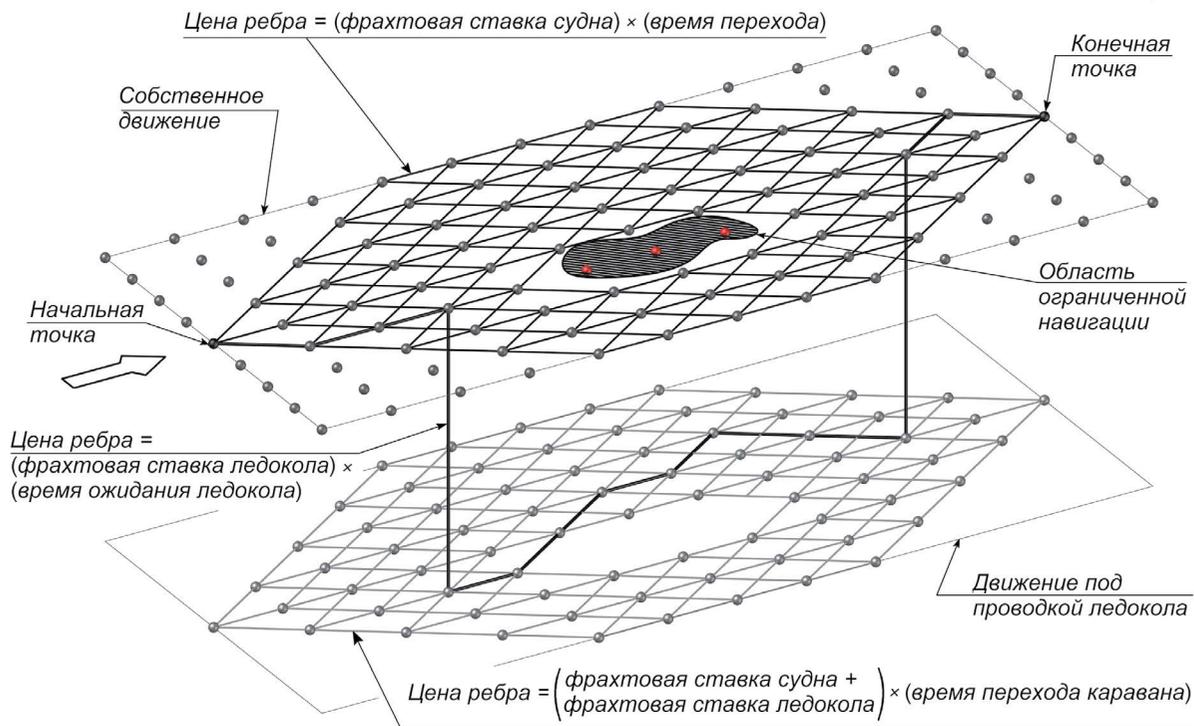


Рис. 7. Описание постановки задачи поиска оптимального маршрута в ледовых условиях

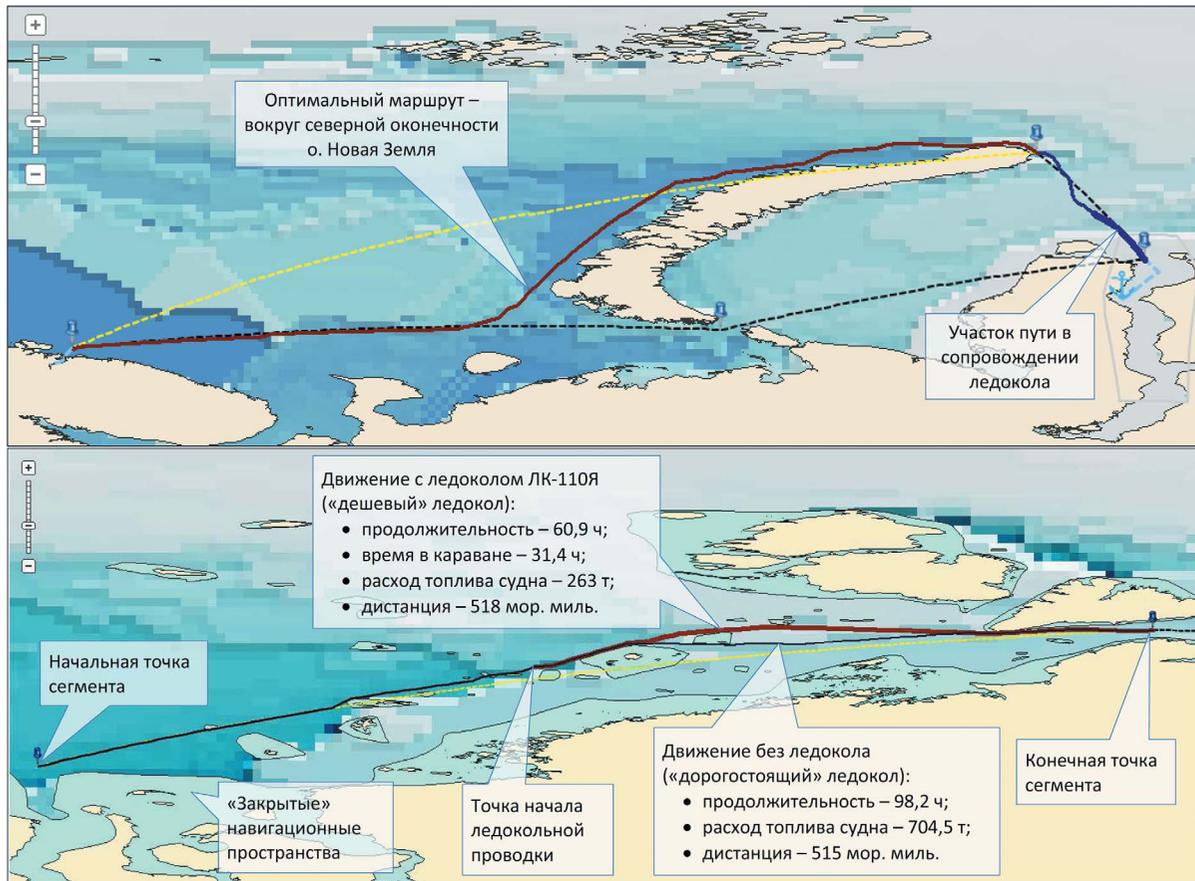


Рис. 8. Примеры практического применения программной технологии рутинга во льдах

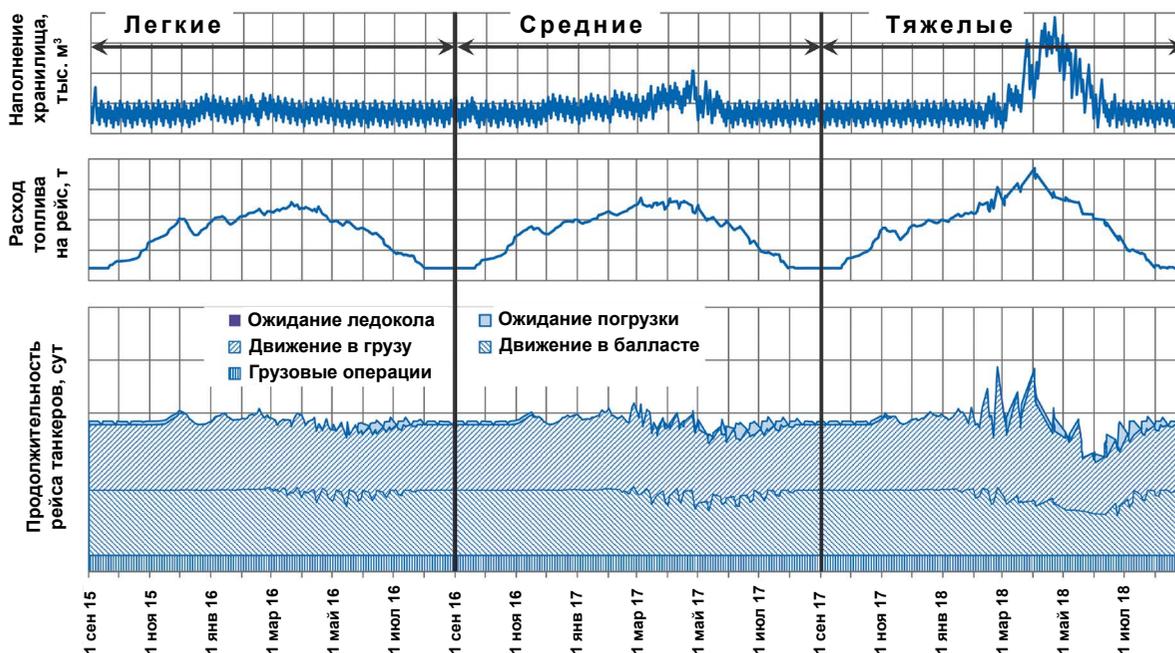


Рис. 9. Изменение технико-эксплуатационных показателей МТС в течение года в зависимости от тяжести ледовых условий (легкие, средние, тяжелые)

Более подробное описание данных исследований содержится в [12], здесь лишь отметим, что решение первой и последней из них стало возможно только благодаря интеграции в рамках единого программного решения моделей движения судов, смерзания ледового канала, наполнения хранилища и блоков планирования работы танкеров.

7. Имитационная модель транспортно-технологической системы вывоза мусора с прибрежных территорий арктических морей и выполнения северного завоза (по заказу Минпромторга России) (рис. 10). Цель состояла в анализе эффективности МТС, совмещающей доставку основных грузов северного завоза с вывозом арктического мусора. Рассматривались 130 населенных пунктов, объединенных в рамках упрощенного логистического графа в 30 условных укрупненных точек снабжения. В рамках работы разработан оригинальный алгоритм стратегического планирования перевозок, который основан не на комбинаторном переборе вариантов, а на полувристической методике формирования графика поставок методом удовлетворения наиболее критических потребностей «от начала к концу». Алгоритм позволяет планировать перевозку отходов как в «попутном» режиме, так и при рассмотрении их в качестве основного груза наряду с грузами северного завоза. В процессе планирования учитываются ограничения по размерениям судов при заходе в различные речные и морские порты. В результате было установлено, что при достаточно высоких скоростях операций по погрузке/выгрузке мусора его плановые объемы (около 6% от завоза сухих грузов) могут быть полностью вывезены за счет обратных рейсов судов, осуществляющих северный завоз.

Заключение

В современных экономических и политических условиях цена ошибок при проектировании систем освоения шельфа оказывается очень высокой. Избежать соответствующих ошибок только за счет применения экспертных подходов практически невозможно, так как опыт реализации арктических шельфовых проектов невелик. Для этого необходимы комплексные междисциплинарные исследования МТС, в обеспечение которых в 2012 г. коллективом авторов начаты и в настоящее время активно продолжаются работы по созданию модульного программного решения открытой и расширяемой архитектуры, синтезирующего на базе объектно-ориентированного подхода такие направления, как геоинформационные системы, судостроительные дисциплины и динамические имитационные модели. Возможности имитационного подхода, позволяющего анализировать недоступные другим подходам параметры МТС, подтверждены рядом выполненных практических работ. Стоимость компьютерных имитационных исследований арктических МТС ничтожно мала по сравнению со стоимостью самой арктической инфраструктуры и ценой возможных ошибок, поэтому комплексное моделирование должно стать определенным стандартом выполнения исследований на этапах проектирования и эксплуатации арктических МТС.

Литература

1. Бахарев А. А., Косоротов А. В., Крестьянцев А. Б. и др. Повышение эффективности работы систем водного транспорта с помощью динамического имитационного моделирования // Транспорт Рос. Федерации. — 2015. — № 4 (59). — С. 33—36.

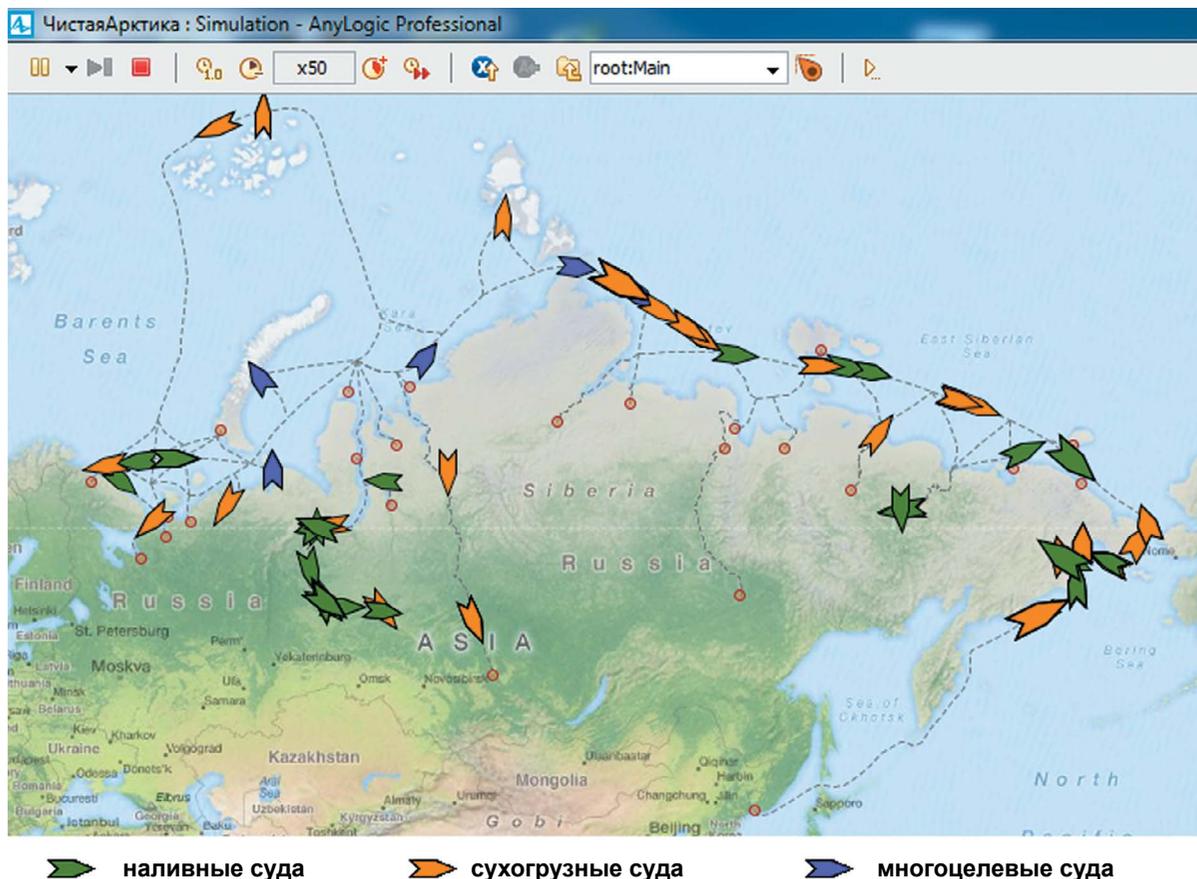


Рис. 10. Имитационная модель системы по вывозу арктического мусора совместно с выполнением северного завоза

2. Бахарев А. А., Косоротов А. В., Крестьянцев А. Б. и др. Иерархия уровней принятия решений в имитационном моделировании морских перевозок // Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2015: Труды конф. — Т. 1. — М.: ИПУ РАН, 2015. — С. 34—39.
3. Борщев А. В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика // Экспонента PRO. — 2004. — № 3—4 (7—8). — С. 38—47.
4. Волков В. В., Норов А. Т., Мешков С. А. Концепция объектно-ориентированного подхода к автоматизации исследовательского проектирования // Программные продукты и системы. — 1996. — № 1. — С. 19—23.
5. Гайкович А. И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: В 2 т. — Т. 1: Описание системы «Корабль». — СПб.: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. — 819 с.
6. Григорьев М. Мониторинг развития инвестиционных проектов по освоению углеводородов арктического шельфа // Материалы 14-го петербургского международного энергетического форума. — СПб., 2014. — С. 17.
7. Дехтярук Ю. Д., Добродеев А. А., Сазонов К. Е. Некоторые вопросы создания морских транспортных систем для вывоза углеводородов из Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2013. — № 2 (10). — С. 84—91.
8. Дехтярук Ю. Д. Анализ инвестиционных затрат на обустройство морских месторождений углеводородов в Арктике // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2008. — Вып. 38 (322). — С. 133—139.
9. Зимин А. Д., Дерябина Л. С. Постановка и особенности решения задачи оптимизации параметров ледокольно-транспортного комплекса // Вопр. судостроения. Сер. 1. Проектирование судов. — 1985. — № 44. — С. 31—40.
10. Карташев А. Б. Типовая экономическая модель обустройства и промышленной эксплуатации морских нефтяных месторождений // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2008. — Вып. 38 (322). — С. 140—148.
11. Кондратенко А. А., Таровик О. В. Сравнительный анализ существующих методов определения функционального и количественного состава флота судов обеспечения // Тр. Крылов. гос. науч. центра. — 2016. — Вып. 94 (378). — С. 201—214.
12. Крестьянцев А. Б., Луцкевич А. М., Таровик О. В. Морские перевозки СПГ: современное состояние и пути оптимизации транспортных систем // Neftegas.ru. — 2015. — № 5. — С. 32—37.
13. Малыханов А. А., Черненко В. Е. Имитационное моделирование логистики снабжения арктических

- бутовых платформ // Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2015: Труды конф. — Т. 2. — М.: ИПУ РАН, 2015. — С. 210—221.
14. Пашин В. М. Оптимизация судов. — Л.: Судостроение, 1983. — 296 с.
15. Сазонов К. Е. Влияние смерзаемости ледяного канала в припайном льду на ледовую ходкость судна // Тр. Крылов. гос. науч. центра. — 2015. — Вып. 88 (372). — С. 159—166.
16. Смирнов В. Г., Миронов Е. У. Ледово-информационное обеспечение морской транспортной системы с использованием современных технологий представления гидрометеорологической информации конечному пользователю // Тр. конф. RAO / CIS Offshore 2009. — Т. 2. — СПб., 2009. — С. 149—153.
17. Таровик О. В., Бахарев А. А., Топаж А. Г. и др. Имитационная модель работы флота как инструмент анализа эксплуатационных параметров судов и обоснования проектных решений // Науч.-техн. сб. Рос. мор. регистра судоходства. — 2015. — № 38/39. — С. 46—52.
18. Таровик О. В., Косьмин М. С. Имитационное моделирование морских транспортных систем, работающих в ледовых условиях с соблюдением графика поставок // Судостроение. — 2014. — № 1. — С. 9—14.
19. Фадеев А. М., Череповицын А. Е., Ларичкин Ф. Д., Егоров О. И. Экономические особенности реализации проектов по освоению углеводородных месторождений шельфа // Экон. и социал. перемены: факты, тенденции, прогноз. — 2010. — № 3 (11). — С. 61—74.
20. Фаулер М. UML. Основы. — 3-е изд.: Пер. с англ. — СПб.: Символ-Плюс, 2004. — 192 с.
21. Штрэк А. А., Буянов А. С. Техничко-экономическое обоснование оптимальных параметров арктического контейнеровоза для транзитных перевозок по Северному морскому пути // Науч.-техн. сб. Рос. мор. регистра судоходства. — СПб., 2016. — С. 23—30.
22. Aas B., Gribkovskaia I., Halskau O., Shlopak A. Routing of supply vessels to petroleum installations // Intern. J. of Physical Distribution & Logistics Management. — 2007. — Vol. 37, № 2. — P. 164—179.
23. Andersson H., Christiansen M., Fagerholt K. Transportation planning and inventory management in the LNG supply chain // Bjørndal E., Bjørndal M., Pardalos P. M., Rönnqvist M. Energy, Natural Resources and Environmental Economics. — [S. l.]: Springer, 2010. — P. 427—439.
24. Choi M., Chung H., Yamaguchi H., Nagakawa K. Arctic sea route path planning based on an uncertain ice prediction model // Cold Regions Science & Technology. — 2015. — № 109. — P. 61—69.
25. Gaspar H. M., Ross F. M., Rhodes D. H., Erikstad S. O. Handling Complexity Aspects in Conceptual Ship Design // Proc. 11th Intern. Maritime Design Conference (IMDC-2012). — Glasgow, UK, June 2012. — P. 339—354.
26. Iyerusalimskiy A., Davis G. D., Suvorov A. et al. Arctic Crude Oil Transportation System Development // Intern. Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE). Lisbon, 2007. — P. 710—715.
27. Kotovirta V., Jalonen R., Axell L. A system for route optimization in ice-covered waters // Cold Regions Science & Technology. — 2009. — № 55 (1). — P. 52—62.
28. Maisiuk I., Gribkovskaia I. Fleet Sizing for Offshore Supply Vessels with Stochastic Sailing and Service Times // 2nd International Conference on Information Technology and Quantitative Management (ITQM-2014). — [S. l.], 2014. — P. 939—948.
29. Redda Y., El-Abed A., Regterschot J., Scholten W. LNG Supply Chain Design and Optimization at Qatargas // 25th World Gas Conference (WGC 2012), Kuala Lumpur, Malaysia, 4—8 June 2012. — Vol. 4. — P. 3638—3651.
30. Riska K., Breivik K., Eide S. I., Gudmestad O. Factors Influencing the Development of Routes for Regular Oil Transport from Dikson // Proc. ICETECH'06, Banff, Canada: Paper 153RF. — 7 p.
31. Solomenikov A. Simulation Modelling and Research of Marine Container Terminal Logistics Chains: Case study of Baltic Container Terminal: Doctoral thesis. — Riga: Transport and Telecommunication Inst., 2006. — 172 p.

Информация об авторах

Кондратенко Александр Алексеевич, инженер, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), e-mail: aleksandrkonratenko@live.com.

Крестьянцев Андрей Борисович, начальник сектора, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), e-mail: a_krestyantsev@ksrc.ru.

Таровик Олег Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), e-mail: tarovik_oleg@mail.ru.

Топаж Александр Григорьевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), e-mail: alex.topaj@gmail.com.

Библиографическое описание данной статьи

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.

ARCTIC MARINE TRANSPORT SYSTEM SIMULATION: MULTIDISCIPLINARY APPROACH FUNDAMENTALS AND PRACTICAL EXPERIENCE

Tarovik O. V., Topaj A. G., Krestyantsev A. B., Kondratenko A. A.

Krylov State Research Centre (St. Petersburg, Russian Federation)

Abstract

Development of new offshore projects in the Arctic begins with comprehensive analysis of Marine Transport System's (MTS) performance. At the same time researchers with different professional orientation (shipbuilders, logisticians, economists and managers etc.) are often have narrow view while making their investigations of MTS, focusing mostly at corresponding familiar sides of the system. It leads to specific "disproportional" description of MTS's when some components considered in detail but other are out of investigation that in some cases may result in inaccurate conclusions. This makes authors sure that the only proper approach to investigate complex arctic MTS should be multidisciplinary.

Article contains the description of integrated R&D project fulfilled at State Krylov Research Centre and devoted to realization of multidisciplinary methodology and corresponding software for arctic MTS design and analysis. Integrated software solution is based on object-oriented paradigm and combines such scientific areas as geographic information systems (GIS), shipbuilding disciplines, discrete event and agent-based simulation models. Theoretical base of the solution and its architecture envelops the following subject fields: ship design and fleet sizing, resistance and propulsion of ships including ice-going capabilities, vessel routing in ice, scheduling, downstream and upstream logistics, navigation process simulation, environment conditions stochastic modeling, operation research, queue theory, economy and management. Software has a modular structure with open and expansible architecture, which makes possible to add new functionality and upgrade existing program blocks in accordance with demands of specific project.

Simulation model serve as the center of multidisciplinary integration because this technology allows reproducing behavior of different objects of MTS under dynamic conditions. Realized in AnyLogic[®] framework simulation model replicates vessel operation process according to individual schedule generated by special planning component. Vessel's activities simulated in modeled time with consideration of special aspects of operational planning and resolving accidents. Main model also includes specialized sub-models that provide opportunity to describe many local dynamic essences such as processes of offshore drilling and production, freeze-up of channel in fast ice, different ship interaction aspects, "weather windows" in ports etc.

Number of instances are also given in the article, they allows to conclude that adequate and consistent model of MTS working in heavy ice-conditions or having complex organization scheme could be obtained only by means of simulation modeling under multidiscipline approach.

Keywords: *marine transport systems, simulation modeling, marine logistics, design of ice class vessels, definition of fleet configuration, modeling of ice navigation, ice routing.*

References

1. Bakharev A. A., Kosorotov A. V., Krestyantsev A. B. et al. Povysheniye effektivnosti raboty sistem vodnogo transporta s pomoshchyu dinamicheskogo imitatsionnogo modelirovaniya. [Increasing operational efficiency of operation of waterborne transport systems through dynamic simulation modelling]. *Transport Ros. Federatsii*, 2015, no 4 (59), pp 33—36. (In Russian).
2. Bakharev A. A., Kosorotov A. V., Krestyantsev A. B. et al. Ierarkhiya urovney prinyatiya resheniy v imitatsionnom modelirovanii morskikh perevozok. [Decision making hierarchy in simulation modeling of marine transportation]. *Sedmaya vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i praktika" IMMOD-2015: Trudy konf.*, T. 1. Moscow: IPU RAN, 2015, pp 34—39. (In Russian).
3. Borshchev A. V. Prakticheskoye agentnoye modelirovaniye i ego mesto v arsenale analitika. [Practical agent-based modeling and its place in analytics toolkit]. *Exponenta PRO*, 2004, no 3—4 (7—8), pp 38—47. (In Russian).
4. Volkov V. V., Norov A. T., Meshkov S. A. Kontseptsiya obyektno-orientirovannogo podkhoda k avtomatizatsii issledovatel'skogo proyektirovaniya. [Concept of object-oriented approach towards automation of research design]. *Programmnyye produkty i sistemy*, 1996, no 1, pp 19—23. (In Russian).
5. Gaykovich A. I. Teoriya proyektirovaniya vodoizmeshchayushchikh korably i sudov: V 2 t, T. 1: Opisaniye sistemy "Korabl". [Design theory for displacement ships and vessels, vol. 1. Description of Ship as System (in Russian)] SPb.: Izd-vo NITs MORINTEKh, 2014, 819 p. (In Russian).

6. Grigoryev M. Monitoring razvitiya investitsionnykh proyektov po osvoyeniyu uglevodorodov arkticheskogo shelfa. [Monitoring of investment projects on Arctic offshore hydrocarbons]. Materialy 14-go peterburgskogo mezhdunarodnogo energeticheskogo foruma. SPb., 2014, pp 17. (In Russian).
7. Dekhtyaruk Yu. D., Dobrodeyev A. A., Sazonov K. E. Nekotoryye voprosy sozdaniya morskikh transportnykh sistem dlya vyvoza uglevodorodov iz Arktiki/ [Some questions on the establishment of marine transport systems for the removal of hydrocarbons from the Arctic]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2013, no 2 (10), pp. 84—91. (In Russian).
8. Dekhtyaruk Yu. D. Analiz investitsionnykh zatrat na obustroystvo morskikh mestorozhdeniy uglevodorodov v Arktike. [Analysis of investment expenses on construction of offshore hydrocarbon field facilities in Arctic]. Tr. TsNII im. akad. A. N. Krylova, 2008, Vyp. 38 (322), pp 133—139. (In Russian).
9. Zimin A. D., Deryabina L. S. Postanovka i osobennosti resheniya zadachi optimizatsii parametrov ledokolno-transportnogo kompleksa. [Icebreaker/transport system optimization problem: statement and solution specifics]. Vopr. sudostroyeniya. Ser. 1: Proyektirovaniye sudov, 1985, no 44, pp. 31—40. (In Russian).
10. Kartashev A. B. Tipovaya ekonomicheskaya model obustroystva i promyshlennoy ekspluatatsii morskikh neftnyanykh mestorozhdeniy. [Standard economic model for construction and commercial development of offshore oil fields]. Tr. TsNII im. akad. A. N. Krylova, 2008, Vyp. 38 (322), pp 140—148. (In Russian).
11. Kondratenko A. A., Tarovik O. V. Sravnitel'nyy analiz sushchestvuyushchikh metodov opredeleniya funktsional'nogo i kolichestvennogo sostava flota sudov obespecheniya. [Comparative analysis of existing methods for defining the functional and numerical strength of support fleet]. Tr. Krylov. gos. nauch. tsentra, 2016, Vyp. 94 (378). pp 201—214.
12. Krestiantsev A. B., Lutskevich A. M., Tarovik O. V. Morskiye perevozki SPG: sovremennoye sostoyaniye i puti optimizatsii transportnykh sistem. [Marine LNG transportation: actual condition and ways of optimization]. Neftegas.ru, 2015, no 5, pp 32—37. (In Russian).
13. Malykhanov A. A., Chernenko V. E. Imitatsionnoye modelirovaniye logistiki snabzheniya arkticheskikh burovnykh platform. [Simulation modeling of logistic chain for Arctic drilling platforms]. Sedmaya vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i praktika" IM-MOD-2015: Trudy konf, T. 2. M.: IPU RAN, 2015, pp 210—221. (In Russian).
14. Pashin V. M. Optimizatsiya sudov. [Ship optimization]. L.: Sudostroyeniye, 1983. 296 p. (In Russian).
15. Sazonov K. E. Vliyaniye smerzayemosti ledyanogo kanala v pripaynom ldu na ledovuyu khodkost sudna. [Effect of the freezing channel in the fast ice upon propulsion performance of ship in ice conditions]. Tr. Krylov. gos. nauch. tsentra, 2015, Vyp. 88 (372), pp 159—166. (In Russian).
16. Smirnov V. G., Mironov E. U. Ledovo-informatsionnoye obespecheniye morskoy transportnoy sistemy s ispolzovaniyem sovremennykh tekhnologiy predstavleniya gidrometeorologicheskoy informatsii konechnomu polzovatelyu. [Ice information support to marine transport system using modern technologies for delivery of hydrometeorological information to the end user]. Tr. konf. RAO / CIS Offshore 2009, T. 2. SPb., 2009. pp 149—153. (In Russian).
17. Tarovik O. V., Bakharev A. A., Topaj A. G. et al. Imitatsionnaya model raboty flota kak instrument analiza ekspluatatsionnykh parametrov sudov i obosnovaniya proyektnykh resheniy. [Simulation model of fleet operation as a tool of ship service parameters analysis and marine transportation system design] Nauch.-tekhn. sb. Ros. mor. registra sudokhodstva, 2015, no 38/39, pp 46—52. (In Russian).
18. Tarovik O. V., Kosmin M. S. Imitatsionnoye modelirovaniye morskikh transportnykh sistem. rabotayushchikh v ledovykh usloviyakh s soblyudeniym grafika postavok. [Simulation modelling of marine transport systems operating in ice conditions in compliance with the deliveries schedule]. Sudostroyeniye, 2014, no 1, pp 9—14. (In Russian).
19. Fadeyev A. M., Cherepovitsyn A. E., Larichkin F. D., Egorov O. I. Ekonomicheskkiye osobennosti realizatsii proyektov po osvoyeniyu uglevodorodnykh mestorozhdeniy shelfa. [Economic features of projects on the hydrocarbon shelf deposits development]. Ekon. i sotsial. peremeny: fakty. tendentsii. prognoz, 2010, no 3 (11), pp 61—74. (In Russian).
20. Fauler M. UML. Osnovy. [UML Distilled]. 3-e izd.: Per. s angl. SPb.: Simvol-Plyus, 2004. 192 p. (In Russian).
21. Shtrek A. A., Buyanov A. S. Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye optimalnykh parametrov arkticheskogo konteynerovoza dlya tranzitnykh perevozok po Severnomu morskomu puti. [Feasibility study of Arctic containership optimal parameters for transit navigation along the Northern Sea Route]. Nauch.-tekhn. sb. Ros. mor. registra sudokhodstva. SPb., 2016, pp 23—30. (In Russian).
22. Aas B., Gribkovskaia I., Halskau O., Shlopak A. Routing of supply vessels to petroleum installations, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2007, vol. 37, no 2, pp 164—179.
23. Andersson H., Christiansen M., Fagerholt K. Transportation planning and inventory management in the LNG supply chain. In: Bjørndal E., Bjørndal M., Pardalos P. M., Rönnqvist M. Energy, Natural Resources and Environmental Economics. Springer, 2010, pp 427—439.
24. Choi M., Chung H., Yamaguchi H., Nagakawa K. Arctic sea route path planning based on an uncertain ice prediction model. Cold Regions Science & Technology, 2015, no 109, pp 61—69.

25. Gaspar H. M., Ross F. M., Rhodes D. H., Erikstad S. O. Handling Complexity Aspects in Conceptual Ship Design. Proceedings of 11th International Maritime Design Conference (IMDC-2012). Glasgow, UK, June 2012.
26. Iyerusalimskiy A., Davis G.D., Suvorov A. et al. Arctic Crude Oil Transportation System Development. Proceedings of International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE). Lisbon, Portugal, 1—6 July 2007.
27. Kotovirta V., Jalonen R., Axell L. et al. A system for route optimization in ice-covered waters. Cold Regions Science & Technology, 2009, no 55 (1), pp 52—62.
28. Maisiuk I., Gribkovskaia I. Fleet Sizing for Offshore Supply Vessels with Stochastic Sailing and Service Times. Proceedings of 2nd International Conference on Information Technology and Quantitative Management (ITQM-2014). Moscow, Russia, 3—5 June 2014.
29. Redda Y., El-Abed A., Regterschot J., Scholten W. LNG Supply Chain Design and Optimization at Qatar-gas. Proceedings of 25th World Gas Conference (WGC 2012), Kuala Lumpur, Malaysia, 4—8 June 2012.
30. Riska K., Breivik K., Eide S.I., Gudmestad O. Factors Influencing the Development of Routes for Regular Oil Transport from Dikson. Proceedings ICETECH'06, Banff, Canada, 16—19 July 2006.
31. Solomenikov A. Simulation Modelling and Research of Marine Container Terminal Logistics Chains: Case study of Baltic Container Terminal. Doctoral thesis, Transport and Telecommunication Institute of Riga, 2006.

Information about the authors

Kondratenko Aleksandr Alekseevich, engineer, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St.-Petersburg, 196158, Russia), e-mail: aleksandrcondratenko@live.com.

Krestyantsev Andrej Borisovich, head of sector, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St.-Petersburg, 196158, Russia), e-mail: a_krestyantsev@ksrc.ru.

Tarovik Oleg Vladimirovich, PhD, senior research engineer, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St.-Petersburg, 196158, Russia), e-mail: tarovik_oleg@mail.ru.

Topaj Aleksandr Grigor'evich, Dr. Sci. Tech., leading research engineer, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St.-Petersburg, 196158, Russia), e-mail: alex.topaj@gmail.com.

Bibliographic description

Tarovik O. V., Topaj A. G., Krestyantsev A. B., Kondratenko A. A. Arctic Marine Transport System Simulation: Multidisciplinary Approach Fundamentals and Practical Experience. The Arctic: ecology and economy, 2017, no 1 (25), pp 86—101. (In Russian).

© Tarovik O. V., Topaj A. G., Krestyantsev A. B., Kondratenko A. A., 2017