

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА МОРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

SIMULATION MODELING BASED SOFTWARE FRAMEWORK FOR DESIGN AND ANALYSIS OF MARITIME TRANSPORT SYSTEMS

**А. Г. Топаж, О.В. Таровик, А. В. Косоротов, А. А. Бахарев
(Санкт-Петербург)**

Введение

Задачи проектирования новых и нахождения наилучших режимов управления эксплуатацией существующих морских транспортных систем (МТС) тесно связаны с проблемой получения оценок эффективности их функционирования в конкретных условиях окружающей среды. Так, оптимизация структуры МТС на стадии предпроектного анализа (определения количественного и качественного состава флота, а также расположения и характеристик объектов береговой инфраструктуры) предполагает возможность сравнения множества альтернативных вариантов по экономическим критериям с целью нахождения наилучшего варианта реализации. Традиционными методами решения этой задачи выступают аналитические методы математического программирования, базирующиеся на оперировании понятием провозоспособности [1]. Однако при таком подходе решения принимаются в условиях критической неопределенности входных данных, так как при этом за рамками рассмотрения оказываются многие определяющие факторы, такие как:

- динамика изменения условий окружающей среды. Этот аспект особенно важен при проектировании арктических транспортных систем, где тяжесть и сезонность ледовых условий выступают основным ограничением на допустимые темпы и объемы перевозок;
- нестационарность внешних условий и внутренних характеристик объектов транспортной системы (обрастание корпуса, приводящее к ухудшению ходкости судов, динамика ввода судов в эксплуатацию, изменение интенсивности грузопотока и пр.);
- пространственная неоднородность условий, то есть обязательность наличия географической привязки (ледовые условия, ветроволновые условия, учет глубины, рекомендуемые маршруты движения);
- учет взаимодействия между грузовыми судами и судами обеспечения, а также между судами и береговыми объектами – возможности использования ледокольной проводки и формирования караванов, ограничения на емкость хранилищ и эффективность причального и грузового оборудования и т.д.;
- возможность проявления экстремальных обстоятельств, приводящая к необходимости не просто оценивать средние характеристики эффективности системы, но давать оценки вероятности ее выхода за рамки устойчивого функционирования, то есть проводить анализ рисков.

Альтернативным универсальным инструментом исследования, позволяющим адекватно ответить на поставленные вызовы, могут служить динамические имитационные модели.

Материалы и методы

Для решения широкого круга задач проектирования и оптимизации параметров морских транспортных систем (МТС) во ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в 2012–2014 годах был разработан специальный программный комплекс (ПК) «МТС-модель». Бизнес-логику комплекса формируют расчетные и информацион-

ные программные модули, при этом в нем реализуется интеграция решений из различных предметных областей:

- геоинформационные среды (ГИС),
- судостроительные дисциплины,
- динамические имитационные модели (ИМ),
- оптимизация и исследования операций.

Принципиальная структура ПК «МТС-модель» приведена на схеме рис. 1, где стрелками показаны информационные потоки между функциональными модулями или наборами данных в системе.

В модуле «Конструктор сценариев», представляющем собой графическую управляющую оболочку программного комплекса, осуществляется задание всей необходимой информации для расчета и анализа исследуемой транспортной системы. В частности здесь осуществляется вся геоинформационная поддержка модельных расчетов, то есть вводятся данные о природных условиях региона, для которого проектируется МТС, с необходимым уровнем временной и пространственной детализации. К этим данным относятся:

- тематические карты, формирующие геоинформационную среду в которой происходит движение судов как активных объектов агентной имитационной модели. В настоящей версии комплекса используются карты (слои): 1) береговой линии, 2) так называемых «закрытых навигационных пространств» (участков прибрежной морской акватории в которых движение либо невозможно, либо осуществляется только по предопределенным «неуклоняемым» фарватерам, и 3) укрупненных регионов характерных статистических параметров распределения направления и скорости ветра, а также высоты волн, которые используются в имитационной модели для стохастической генерации текущих погодных условий. В качестве графической «информационной» подложки используется слой тайловых карт от провайдера OpenStreetMap, с которым возможна работа в том числе и в отсоединенном режиме (с использованием локального кэша);

- предопределенные маршруты движения судов, которые делятся на два типа: «фарватеры» (строго заданные и обязательные маршруты движения) и «логистические вектора» (условные маршруты движения между узловыми точками географического пространства, допускающие динамическую маршрутизацию, то есть поиск оптимальной траектории движения для каждого судна в зависимости от его класса и складывающейся обстановки);

- базы данных параметров тяжести ледовых условий и батиметрии (глубин). Эти характеристики задаются в узлах регулярных сеток географических координат с шагом 15' для льда и 1' для глубины. Параметры льда определяются для легких, средних, тяжелых и экстремально тяжелых ледовых условий отдельно для каждого календарного месяца. Для каждого квадрата сетки вводятся такие характеристики льда как сплоченность (общая и частная), возрастной состав, форма, торосистость и пр., то есть все те параметры, которые необходимы для расчета скорости движения судов и расходов топлива;

- характерные «экономические» регионы, для которых могут быть заданы различные правила исчисления налогов и сборов в зависимости от типа судна, времени года и параметров груза. Особый тип регионов используется для описания зон работы ледоколов или иных логических ограничений.



Рис. 1. Принципиальная структура основных программных блоков и их связей (показаны линиями) ПК «МТС-модель»

В конструкторе сценариев также определяются сведения о типах и основных характеристиках перевозимых грузов, задаются сведения о местонахождении и структуре портов (координаты рейда, положения, типы и габаритные размеры причалов, наличие и производительность грузовых приспособлений, объемы хранилищ и т. д.). Здесь же происходит задание типов (проектов) транспортных судов и ледоколов, эксплуатационные качества которых будут анализироваться в ходе имитационного моделирования исследуемой системы. При этом атрибутивная информация, определяющая уникальность каждого отдельного проекта, может быть как задана явным образом, так и рассчитана по ограниченному набору ключевых характеристик исходя из аналитической расчетной модели судов конкретного класса (танкера, газовозы, контейнеровозы и т.д.). Соответствующие расчетные модели построены на основе сведений и методик судостроительных специальностей и реализованы в виде отдельных программных модулей, подключаемых к конструктору сценариев как внешние плагины.

Наконец, важнейшей характеристикой МТС является «транспортная напряженность» – описание потребных объемов перевозимых грузов и логистических каналов снабжения. Эти данные задаются в Конструкторе сценариев в рамках специализированной информационной подмодели вида «стоки-источники».

В теории и практике управления МТС можно выделить три уровня принятия решений, исходя из ширины т.н. «горизонта планирования», степени ответственности ЛПР и масштаба задачи [2].

Проектный уровень – стратегическое планирование вариантов реализации МТС, исходя из перечисленных выше, задаваемых явным образом, статических данных о ее структуре и характеристиках. Этот уровень имеет горизонт планирования, равный времени полного жизненного цикла МТС. Он реализуется в рамках упрощенных логических алгоритмов, составляющих оптимизационный блок конструктора сценариев [3], и состоит в нахождении одного или нескольких базовых вариантов МТС, наилучшим

образом обеспечивающих транспортные потоки в заданных ограничениях. В состав каждого полученного варианта реализации МТС входит проектный состав флота (потребное количество судов и ледоколов для каждого из анализируемых типов), укрупненные графики поставок (расписание рейсов), предпочтительные маршруты движения (рассчитанные отдельно для каждого типа судна, времени года и тяжести ледовых условий) и таблица соответствующих этим маршрутам затрат (расходы топлива, времени, доля ледокольного сопровождения и т.д.). Для поиска оптимального пути следования судов во льдах (ледовый роутинг), используется оригинальный алгоритм оптимизации на двухуровневом ориентированном графе, который позволяет не только определить путь, соответствующий минимальному времени следования, но и найти оптимальный объем ледокольного сопровождения с учетом условной «стоимости» привлечения ледокола.

Детальный анализ эффективности, уточнение и подробное исследование каждого полученного варианта реализации МТС осуществляется в модуле информационного моделирования, который является динамическим ядром разработанного программного комплекса. В построенной имитационной модели экземпляры судов представляются в виде активных объектов, движущихся и взаимодействующих между собой в геоинформационном пространстве. Модель реализована в специализированной среде имитационного моделирования **AnyLogic®** и в ее составе выделяются три принципиальных блока: логические модули управления «Капитан» и «Оператор», а также набор встроенных динамических подмоделей условий функционирования транспортной системы.

Плановый уровень – среднесрочное управление перевозками, соответствующее масштабу деятельности транспортной компании и имеющее горизонт планирования, равный нескольким месяцам, – осуществляется в модуле «оператор». Сфера ответственности «оператора» включает в себя: обеспечение требуемого объема перевозок; соблюдение графика поставок; назначение конкретных экземпляров транспортных судов на конкретные рейсы; управление ледокольным сопровождением судов, исходя из имеющихся ледоколов; отправку судов на докование; оперативное регулирование, направленное на разрешение возникающих инцидентов в масштабе целой системы (опоздания, нехватка судов и т.д.). Логика работы «оператора» в ходе проведения имитационных расчетов базируется на постоянном динамическом перепланировании, которое производится путем анализа складывающейся ситуации, и представляет собой некий аналог технологии CRP – Capacity Requirements Planning.

Оперативный уровень планирования входит в сферу ответственности «капитана» транспортного судна или ледокола в режиме выполнения им конкретного задания на перевозку или сопровождение соответственно. Основной решаемой здесь задачей выступает определение оптимальной скорости движения с учетом возможностей судна (эту информацию для складывающейся метеорологической и ледовой обстановки «капитан» запрашивает у внешнего расчетного модуля «механик»), текущего статуса выполняемого задания (степень его срочности и наличие резерва времени), а также требования минимизации сопутствующих расходов на перемещение (расходы топлива и т.д.).

Дополнительным преимуществом применения технологии имитационного моделирования для анализа эффективности работы МТС выступает возможность подключения к базовой логике модели (которая в данном случае представляет собой просто описание динамики движения агентов в геоинформационном пространстве) подмоделей детальной имитации тех или иных процессов или аспектов функционирования исследуемой динамической системы. Это позволяет повысить уровень соответствия модели реальности и, в конечном счете, адекватность и точность модельных прогнозов. Так, в рамках имитационного блока «МТС-Модель» дополнительно реализованы:

- системно-динамическая модель зарастания ледового канала в припае,
- системно-динамическая модель испарения сжиженного природного газа в танках судна-газовоза,
- дискретно-событийная модель грузообработки судов с учетом «окон погоды».

Таким образом, в реализованном решении в полной мере использована предоставляемая инструментарием **AnyLogic** возможность «смешения» разных технологий или парадигм имитационного моделирования в одном комплексном «гибридном» проекте.

Результаты, полученные в ходе многолетних «прогонов» имитационной модели (статистика времен рейсов, эксплуатационные характеристики, вероятности экстремальных срывов поставок и т.д.), в свою очередь, используются для корректировки вариантов реализации МТС и пополнения базы знаний о характерных маршрутных (операционных) затратах. Тем самым замыкается петля обратной связи и информационной поддержки всех уровней решений.

Результаты

С помощью ПК «МТС-модель» в 2014-2015 годах сектором проектирования морских систем освоения шельфа отдела системной интеграции в области гражданского судостроения ФГУП «Крыловский государственный научный центр» был выполнен ряд практических работ.

1. Создана и проанализирована модель работы мелкосидящих ледоколов проекта 22740 в Азово-Черноморском и Каспийском бассейнах.

2. Выполнена оценка характеристик МТС, обеспечивающей вывоз углеводородов Ванкорского региона (Карское море) в западном и восточном направлениях, включая круглогодичное движение по трассам СМП.

3. Разработана имитационная модель движения крупнотоннажных танкеров из района мыса Каменный (Обская губа) до порта Мурманск в условиях смерзающегося ледового канала в припае [4].

4. Определены эксплуатационные параметры работы ледокола-лидера ЛК-110Я при работе в восточном секторе Арктики при проводке караванов различного типа.

Полученные результаты подтверждают широкие возможности имитационного подхода в области проектирования и анализа МТС, позволяющего учитывать множество натуральных факторов работы судов, моделировать различные аспекты работы МТС, а также оптимизировать характеристики судов в составе МТС с учетом логики ее работы.

Литература

1. **Пашин В. М.** Оптимизация судов, Л.: Судостроение, 1983 – 296 с.
2. **Бабурин В. А., Бабурин Н. В., Дмитриев В. И.** Управление работой флота: учебник, М.:Моркнига, 2013. – 368 с.
3. **Таровик О. В., Космин М. С.** Имитационное моделирование морских транспортных систем, работающих в ледовых условиях с соблюдением графика поставок// Судостроение, 2014, №1, С. 9–14
4. **Крестьянцев А. Б., Луцкевич А. М., Таровик О. В.** Морские перевозки СПГ: современное состояние и пути оптимизации морских транспортных систем//Neftegaz.ru, 2015, №5, С. 26–31