

УДК 629.5:004.94

## Опыт имитационного моделирования арктических транспортных систем

*А.Г. Тонаж, О.В. Таровик, А.А. Кондратенко  
Крыловский государственный научный центр,  
г. Санкт-Петербург*

Вопросы анализа и проектирования морских транспортных систем (МТС) лежат на стыке множества научных направлений – судостроительных дисциплин, морской логистики, экономических специальностей и информационных технологий. При этом модельная или математическая интерпретация МТС и, соответственно, выбор адекватного аппарата ее описания зачастую оказывается существенно различающейся для специалистов разной «ведомственной» принадлежности.

Так, среди специалистов-судостроителей принято рассматривать МТС в контексте решения задачи проектирования судна. Отдельно в судостроительном направлении стоит ряд работ, выполненных в 1970–1980-х годах под руководством академика В.М. Пашина, где предложена концепция двухуровневой оптимизации судна. При этом верхний уровень оптимизации посвящен определению состава флота и основных характеристик судов для заданного региона на основе решения задачи математического программирования [1].

Для специалистов в области морской логистики на первый план выходят вопросы создания оптимального плана грузоперевозок, определения необходимых площадей и объемов береговых хранилищ и подобные смежные задачи логистической направленности. Для их решения также используются методы исследования операций, в частности разнообразные модификации транспортной задачи, а также подходы теории массового обслуживания [2].

Вместе с тем, любые аналитические методы, которые в принципе могут быть признаны адекватными для описания транспортных систем низких широт, оказываются совершенно непригодными для арктических транспортных систем, где принципиальное значение приобретает существенная нестационарность и плохая предсказуемость внешних условий, в основном – ледовой обстановки. Без учета фактора льда и ходовых качеств судов во льдах все получаемые модельные прогнозы и результаты оказываются зависящими от критической неопределенности входных данных и допущений, сделанных в процессе расчета.

Авторы убеждены, что единственным средством создания качественных и адекватных реальности моделей арктических МТС является

ся междисциплинарный подход с переходом от узконаправленных аналитических и полуаналитических моделей к гибридным имитационным моделям. С этой целью, начиная с 2012 года, в рамках Федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники» был выполнен комплекс работ по созданию универсального информационного комплекса, предназначенного для проектирования и анализа работы морских транспортных систем, работающих в ледовых условиях [3, 4]. Основная идея данной работы заключается в интеграции в рамках единого программного обеспечения методов и подходов из различных предметных областей:

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

В настоящем сообщении излагается опыт применения разработанного решения в ряде практических заказных работ с упором на значимость специфических математических методов, имеющих особую важность в каждом конкретном случае.

**Модель эксплуатации атомного ледокола-лидера мощностью 120 МВт (по заказу Минпромторга России).** Целью исследования была оценка эксплуатационных возможностей и показателей эффективности работы перспективного проекта атомного ледокола-лидера при проводке судов в восточном и западном секторах Арктики. Важной теоретической проблемой, решенной в рамках этой работы, была задача выбора оптимального маршрута движения во льдах (роутинга). Известно, что арктические суда практически не ходят во льдах прямыми курсами, а максимальным образом используют имеющиеся полыньи и районы более слабого льда, значительно отклоняясь от стандартных прямолинейных маршрутов. 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. Дополнительную сложность придает факт сильной динамичности изменения ледовой обстановки, когда ледовые условия в конкретной географической точке могут существенно меняться в ходе следования судна по маршруту.

Для решения этих задач был применен алгоритм A\*, позволяющий найти оптимальный путь на трехмерном ориентированном графе, причем стоимость ребра высчитывается динамическим способом по мере прохождения графа от начала к концу. Иллюстрация к постановке оптимизационной задачи представлена на рисунке 1. Географический регион между начальной и конечной точками маршрута представляется в виде регулярной сеточной области, для каждого ребра которой определяется условная цена прохождения, равная произведению фрахтовой ставки судна и прогнозной длительности прохождения модельным судном данного ребра. 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. Примеры решения задач ледового роутинга показали высокую эффективность предложенного алгоритма.

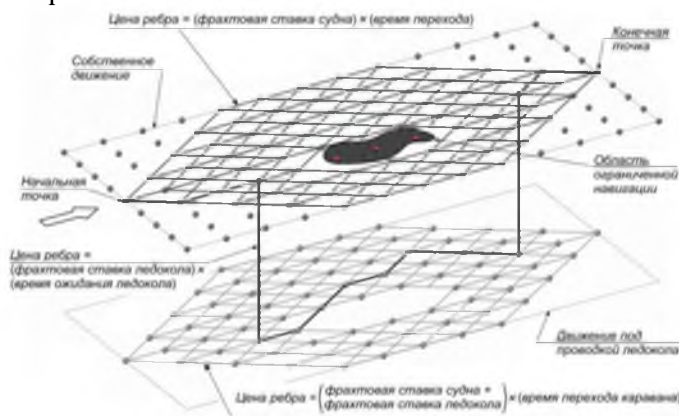


Рисунок 1 – Описание постановки задачи поиска оптимального маршрута в ледовых условиях

Имитационная модель работы арктических танкеров Новопортовского месторождения на линии от мыса Каменный (Обская губа) до порта Мурманск в условиях смерзающего ледового канала в припас (по заказу ООО «Газпром нефть Новый Порт»). Особенностью данного исследования являлось определяющее влияние протяженного ледо-

вого канала на все элементы МТС: танкеры, береговое хранилище, дежурный ледокол. Модификация модели ледового канала [5] и интеграция ее в основную имитационную модель позволили решить ряд важных практических задач. Пожалуй, наиболее значимым результатом здесь было нахождение факта принципиальной важности обеспечения регулярности движения танкеров (даже путем искусственного замедления их хода по чистой воде и битому льду) с целью предотвращения эффекта «скупивания» всех транспортных ресурсов и, соответственно, длительных временных промежутков смерзания периодически обновляемого канала.



Рисунок 2 – Влияние регулярности движения судов на показатели эффективности МТС

Комплексный анализ и выработка рекомендаций по оптимизации морской транспортно-технологической системы нефтедобывающей платформы «Приразломная» (по заказу ООО «Газпром нефть шельф»). Морская ледостойкая стационарная платформа «Приразломная» (МЛСП) – первая и единственная в мире стационарная платформа, которая ведет добычу нефти на шельфе в тяжелых условиях Арктики. Транспортная система МЛСП подвержена влиянию ряда уникальных факторов, которые сказываются на исполнении плана перевозок и поэтому должны учитываться при построении комплексной имитационной модели снабжения платформы и вывоза добытой нефти. К таким факторам относятся:

1. Вариабельность метеорологической и ледовой обстановки как у самой платформы, так и на маршрутах следования судов.

2. Наличие нескольких альтернативных терминалов со специфическими ограничениями на возможность осуществления грузовых операций в зависимости от складывающейся погодной обстановки.

3. Наличие ограничений на возможность одновременного осуществления грузовых операций у МЛСП танкерами и судами снабжения, что приводит к конкуренции танкеров и судов снабжения за «окна погоды» терминалов.

4. Динамичность грузопотоков нефти и грузов снабжения, наличие причинно-следственных связей между объемами доставки снабжения на платформу и вывоза отработанных материалов.

5. Ограниченность объема хранилища нефти и площадей складирования тарных грузов на платформе.

6. Сложная и вариативная логика операций грузообработки транспортных судов у платформы (как правило, погрузка танкеров и разгрузка судов снабжения вынужденно производится не непрерывно, а за несколько последовательных подходов).

Очевидно, что одновременный учет всех перечисленных факторов с приемлемой степенью точности возможен только в рамках комплексной динамической имитационной модели, включающей в себя элементы дискретно-событийного и агентного подходов. Дополнительно в состав этой имитационной модели для решения поставленных задач был интегрирован ряд специфических оригинальных модулей:

- Стохастический генератор природных условий морской акватории в районе МЛСП позволяет получать временные ряды 15-ти имитируемых метеозадаваемых элементов (скорость и направление ветра, течения и волнения, температура, видимость, параметры ледовой обстановки и т.д.) Внутренняя логика алгоритма погодного генератора содержит в себе как элементы формального статистического моделирования (получение реализаций погоды как многомерного дискретного случайного процесса с заданными авто- и кросскорреляционными свойствами методами формирующих фильтров и марковских цепей), так и физически-обоснованные подходы. Запуск генератора погоды в режиме моделирования в «будущем времени» позволяет эмулировать в имитационной модели наличие гипотетических краткосрочных прогнозов погоды длительностью 4–7 часов, характеризующихся 100% оправданностью. Такой прогноз позволяет осуществлять оперативное планирование грузовых операций.
- Алгоритм тактического планирования перевозок служит для получения расписания рейсов всех судов (танкеров и судов снабжения) на период моделируемого цикла работы системы. План дол-

жен содержать загрузку судов в каждом рейсе и рационально удовлетворять ограничениям, в роли которых выступают требования обеспечения интегральных объемов перевозок и доставки грузов к срокам, обусловленным технологическими процессами на платформе. Основная идея примененного подхода состоит в удовлетворении критических потребностей снабжения «от начала к концу» и выборе лучшего судна-исполнителя с учетом ограничений на объемы стационарных и судовых хранилищ, характерных времен рейсов и длительности грузовых операций. Алгоритм планирования воспроизводит динамику наполнения грузовых хранилищ и площадок МЛСП, однако в отличие от имитационной модели в нем отсутствуют стохастические факторы, а сам план создается «оптимистичным», что позволяет раскрыть все возможности транспортной системы при его исполнении.

- Дискретно-событийная модель операций судов в МЛСП описывает процесс осуществления погрузочно-разгрузочных операций у терминалов платформы с учетом складывающихся условий и технологических ограничений. В нее заложена возможность проведения последовательных операций с грузами различного типа, заблаговременного прерывания операции при ожидаемом прекращении «окна погоды» с пережиданием неблагоприятного периода у терминала, переходом к альтернативному терминалу или отходом судна за пределы трехмильной зоны МЛСП. Полный вид соответствующей дискретно-событийной потоковой диаграммы в нотации AnyLogic ® приведен на рисунке 3.

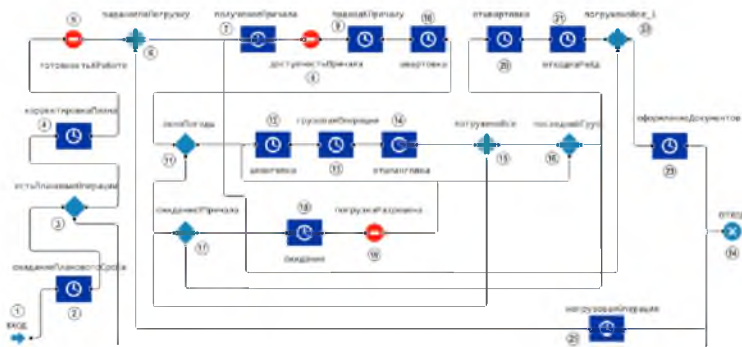


Рисунок 3 – Потоковая диаграмма прохождения заявок на погрузку/выгрузку судна для МЛСП

- Модель управления интенсивностью добычи схематизированно описывает реальные технологические процессы МЛСП. оборудо-

вание платформы позволяет осуществлять ситуативное снижение интенсивности добычи нефти по сравнению с плановыми номинальными показателями. Это значительно повышает гибкость системы хранения и перевозки нефти, позволяя компенсировать длительные неблагоприятные погодные явления и различные отклонения от идеального плана снабжения и вывоза нефти. Модель реализована с помощью простого конечного автомата с пятью возможными состояниями: плановая добыча, снижение, сниженная добыча, останов, восстановление добычи.

На основе созданного программного инструмента была смоделирована работа более 30 различных вариантов конфигурации транспортной системы МЛСП «Приразломная». Программа исследований включала анализ влияния на эффективность системы 11 улучшающих мероприятий организационно-технического характера, имеющих различный масштаб и стоимость реализации. Результаты проведенной работы послужили основой для принятия управленческих решений на верхнем уровне компании «Газпром нефть шельф», а полученные рекомендации внедряются в практику работы МЛСП «Приразломная» и реализуются в виде руководящих документов. Экономический эффект от данной работы представляется весьма значительным. Столь масштабное и детальное исследование работы реального объекта арктической шельфовой техники на основе дискретно-событийного и агентного имитационного моделирования было выполнено впервые в мировой практике [6].

Не будет преувеличением декларировать, что «рекламируемый» подход – мультипарадигменное имитационное моделирование – это единственный на сегодняшний день реальный инструмент, позволяющий адекватно ответить на те вызовы, которые предъявляет необходимость комплексного анализа столь сложных объектов как арктические транспортные системы.

### **Библиографический список**

1. Пашин В.М. Оптимизация судов. – Л.: Судостроение, 1983. – 296 с.
2. 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. 1.], 2014. – P. 939–948.
3. 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. – №1 (25). – 2017. – С. 86–101.

4. Топаж А.Г., Таровик О.В., Косоротов А.В., Бахарев А.А. Программный комплекс имитационного моделирования для проектирования и анализа морских транспортных систем // В сборнике трудов конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем – ИКМ МТМТС-2015», Санкт-Петербург, 3 июля 2015 г. – Санкт-Петербург, 2015. – С. 143–147.

5. 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.

6. Зайкин Д.А., Крестьянцев А.Б., Таровик О.В., Топаж А.Г. Использование имитационного моделирования для анализа морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – №1 (68). С. 44–48.

## УДК 519.673

### **Анализ графов социальных взаимодействий в реальной и виртуальной среде**

*А.С. Тякунов, В.В. Славский, А.О. Ташкин  
ЮГУ, г. Ханты-Мансийск*

Анализ социальных взаимодействий как в теоретическом, так и в практическом плане находится на пересечении многих существующих областей науки (математика, психология, социология и т.д.), а также порождает такие смежные дисциплины как, например, киберпсихология, что позволяет сделать вывод о важности исследований, проводимых в данном направлении. Так, важной задачей подобного анализа следует назвать выделение центральных узлов сети - субъектов социальных взаимодействий, оказывающих максимальное информационное взаимодействие на остальных участников внутри некоторого сообщества. Главный аспект здесь состоит в том, что взаимодействия разных типов, складываясь в единый комплекс, зачастую могут существенно изменить общую структуру передачи информации внутри группы людей. В качестве анализируемой структуры, совмещающей в себе возможности реальных и виртуальных взаимодействий, предлагается использовать рабочий коллектив организации - данная форма объединения позволяет предположить некоторую общность людей по