ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ, РАБОТАЮЩИХ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ С СОБЛЮДЕНИЕМ ГРАФИКА ПОСТАВОК

О. В. Таровик, М. С. Косьмин (ФГУП «Крыловский ГНЦ»,
e-mail: krylov5@krylov.sp.ru)

УДК 656.612:629.543

Задача определения оптимального состава морской транспортной системы (МТС), так называемая «внешняя задача» проектирования судов [1], достаточно часто возникает перед современными судостроителями и решается, как правило, с использованием аналитической модели движения судов на линиях и традиционных методов поиска экстремума экономического критерия, то есть — математического программирования (МП). Однако такой подход имеет ряд недостатков, которые наиболее ярко проявляются в случае, когда на маршрутах следования судов имеется лед, приводящий к задержкам рейсов, либо суда должны строго соблюдать график поставок груза, либо необходим учет ограниченного числа ледоколов, либо действуют другие нестационарные факторы.

Несмотря на известные трудности экономического характера, в долгосрочной перспективе актуальны именно арктические системы морской транспортировки углеводородов, работающие в ледовых условиях. Тщательному исследованию таких МТС должно уделяться особенное внимание, так как арктические транспортные суда строятся, как правило, для нужд определенных МТС, а устойчивого фрахтового рынка танкеров и судов-газовозов с ледовым классом не существует. В связи с этим ошибки в оценках количества и вместимости таких судов не могут быть компенсированы посредством фрахтования дополнительных или сдачи во фрахт «избыточных» судов.

Стремление преодолеть недостатки традиционного МП-подхода, о которых будет сказано далее, обусловило необходимость применения для данных задач методов имитационного моделирования (ИМ) — очень динамично развивающегося направления компьютерного моделирования систем. В данной статье освещены некоторые особенности современного моделирования МТС, работающих в ледовых условиях с соблюдением графика поставок, которые позволяют судить об эффективности применения имитационного подхода в целом.

Оптимизация МТС с использованием МП. Активное развитие методов оптимизации [1] МТС при помощи МП пришлось на 60—80-е годы XX века [2, 3]. МП позволяет оптимизировать по экономическому критерию такие параметры МТС как грузоподъемность судов, скорость их хода, различные конструктивные и проектные решения.

Не останавливаясь на деталях классической формулировки задачи МП применительно к моделированию МТС, перечислим недостатки МП-подхода[1]. Так как МП-модели имеют аналитический характер, единственным параметром движения судна на линии, влияющим на результаты оптимизации МТС, является его провозоспособность на этой линии, причем все прочие параметры судна, так или иначе, сводятся к его провозоспособности. Введение этого параметра позволяет сформулировать задачу оптимизации МТС, но при этом существенно загрубляет модель по отношению к действительности, так как МП оперирует статичной постановкой оптимизационной задачи. Расширяя сказанное, можно констатировать, что подход МП имеет два глобальных недостатка: отсутствие в математической модели временной оси; отсутствие возможности реализации логики управления судами.

Следствием этих недостатков является то, что МП не позволяет учитывать следующие факторы:

1. Факторы, зависящие от времени. Например, график поставок груза, влияние обрастания корпуса и движителей на расходы топлива, кратковременное скачкообразное изменение грузопотока (не превышающее по своей продолжительности времени рейса) и т. п.

2. Факторы непредвиденных задержек судна в рейсе (например, из-за ледовых условий) при условии наличия требований о регулярности поставок груза в конечный порт. В зависимости от ситуации, судно может увеличивать или уменьшать скорость (и, соответственно, — расходы топлива), чтобы соблюсти требуемый график поставок.

[1]Под оптимизацией МТС с использованием МП здесь и далее понимается именно классическая постановка данной задачи, опирающаяся на аналитическую модель движения судов на линиях и использовавшаяся в [2, 3] и других работах периода 60—80-х годов.

3. Логика взаимодействия ледоколов и грузовых судов во время ледокольной проводки. Например, транспортное судно и ледокол могут ожидать друг друга у кромки льда, или же может формироваться караван для проводки нескольких судов.

Эти недостатки несущественны, если МТС функционирует в условиях чистой воды, так как время хода незначительно меняется от рейса к рейсу, что практически не нарушает регулярности поставок, необходимость моделирования взаимодействия судов отсутствует. В случае же моделирования МТС, работающих в ледовых условиях, необходимо введение допущений (см., например, [4]), которые смогут обеспечить применимость МП-подхода для решения оптимизационной задачи:

1. Время рейса и расходы топлива являются постоянными для каждого типа судна и для каждого варианта тяжести ледовых условий. Возможность ускорения-замедления судна не учитывается.

2. Ледокольное обслуживание судов на каждом подучастке трассы проводится ледоколами необходимого типа без задержек и в требуемом объеме, то есть ледоколы считаются «неограниченным ресурсом».

3. Регулярность поставок не рассматривается, учитывается только необходимость обеспечения требуемого годового грузопотока, исходя из провозоспособности судна на линии.

В условиях ограниченного количества ледоколов, необходимости обеспечения регулярности поставок, учета динамики грузопотока и т. п., подход МП не позволяет достоверно моделировать МТС, функционирующую в ледовых условиях. Указанные недостатки в полной мере позволяет преодолеть ИМ, для которого характерно наличие временной оси в вычислительном эксперименте, а также существует возможность моделирования логики объектов.

Применение имитационного моделирования для оптимизации МТС. В настоящее время существует три основные системы взглядов, подходов и концепций, используемые в качестве каркаса при построении ИМ [5]: системная динамика, дискретно-событийное моделирование, агентные системы. Две первые парадигмы сформировались в 50—60-х и с тех пор практически не изменились. Агентные системы начали активно развиваться в начале 2000-х, что обусловлено как развитием вычислительных возможностей компьютеров, так и развитием объектно-ориентированного программирования, которое, собственно, и обеспечивает возможность создания объектов и их поведенческих моделей. Применительно к моделированию МТС интерес представляют дискретно-событийный и агентный подходы (а также их сочетания), которые различаются как своими возможностями, так и сложностью создания соответствующих моделей. Так, агентный подход является наиболее сложным и требует разработки поведенческой модели судна, логики управления транспортной системой (аналог «оператора» в судоходной компании), создания геоинформационной компьютерной среды существования объектов и имеет самую высокую вычислительную сложность. Но при этом только агентный подход позволяет моделировать взаимодействие судов и преодолевать все недостатки МП-подхода. Дискретно-событийная модель является более простой, больше подходит именно для задач оптимизации, так как имеет значительно меньшую вычислительную сложность. Но, в то же время, такая модель позволяет учитывать только временной фактор, то есть изменение характеристик МТС и ее элементов во времени. Агентная имитационная модель арктической МТС в настоящее время разрабатывается во ФГУП «Крыловский ГНЦ», но описание этой работы выходит за рамки настоящей статьи, поэтому основное внимание уделяется дискретно-событийной модели МТС, которая также позволяет продемонстрировать возможности имитационного подхода.

Следует отметить, что в период 80-х годов появился ряд отечественных работ, посвященных ИМ речного флота (см. [6] и ее библиографию) и флота на арктических линиях ([7, 8] и др.). Указанные работы описывают, по существу, дискретно-событийные модели, которые, однако, очень отличаются от современных. Главное отличие состоит не столько даже в разнице вычислительных возможностей техники, сколько в том, что в указанный период инженеры-судостроители вынуждены были самостоятельно программно реализовывать типичные элементы ИМ: конечные и вероятностные автоматы, системы массового обслуживания различных типов, системы, описываемые дифференциальными уравнениями и т. п. В настоящее время реализация ИМ возможна в программных комплексах, позволяющих сочетать различные парадигмы имитационного моделирования, что существенно расширяет возможности моделей и, кроме того, принципиально упрощает их программную реализацию.

Отметим также, что внедрение ИМ в расчет и оптимизацию МТС не позволяет перечеркнуть пласт результатов, полученных при МП-оптимизации, так как ряд постановочных вопросов (декомпозиция оптимизационной задачи, подходы к определению характеристик судна) не теряют своей актуальности. Кроме того, работа ИМ требует больших вычислительных ресурсов, чем работа МП-моделей, поэтому, видимо, допустимы разумные комбинации этих двух подходов.

Далее рассмотрим пример дискретно-событийной модели МТС. Несмотря на то, что данный пример является частным случаем МТС, он позволяет продемонстрировать возможности и особенности ИМ.

Пример дискретно-событийной модели МТС. Рассматриваемая модель описывает сценарий вывоза сжиженного природного газа (СПГ) с месторождения в районе Чешской губы (Баренцево море) по двум линиям (рис. 1) при условии строгого соблюдения графика поставок. Последнее является характерной чертой перевозок СПГ. Модель реализована с помощью программного комплекса ИМ AnyLogic, позволяющего связать логику работы модели и ее анимацию.

Цель данной модели — учесть требования регулярности поставок при оптимизации на основании экономического критерия следующих параметров МТС: количество n судов-газовозов СПГ; вместимость Q судов.

Экспортный терминал СПГ и береговой резервуарный парк расположены в водах, сезонно покрывающихся льдом. Для обеспечения сопоставимости различных вариантов конфигурации МТС в ходе оптимизации, в настоящей работе принимает-

ся, что ледовые условия являются детерминированными и изменяются по месяцам. Протяженности ледовых участков трассы при легких, средних и тяжелых ледовых условиях в различные месяцы года показаны на рис. 2, причем для каждого типа условий известны параметры льда, позволяющие рассчитать время прохождения ледового участка и расходы топлива[2]. Ветро-волновые условия также принимаются детерминированными и постоянными в течение всего года. Последнее обусловлено тем, что сезонные колебания параметров ветра и волнения практически не сказываются на движении крупнотоннажных газовозов СПГ.

В модели рассматриваются суда-газовозы мембранного типа No96: вместимость 110—240 тыс. м^3 (98% заполнения танков); ледовая категория ARC4 (по PMPC); форма корпуса с бульбом; тип энергетической установки (ЭУ) — двухвальная дизель-электрическая ЭУ, работающая на парах СПГ; установка повторного сжижения паров газа (УПСГ) не применяется. Определение характеристик судов-газовозов проводится на основе регрессионно-аналитической модели [9]. Отметим, что в рамках настоящей статьи в целях упрощения не рассмотрена оптимизация ледовой категории судов-газовозов и эксплуатационной скорости хода. Ледовая категория ARC4 принята в соответствии с ледовым условиями рассматриваемого региона и при условии, что суда всегда сопровождаются ледоколами. Скорость хода принята на основании статистических данных [9].

Подход к моделированию регулярных перевозок. Регулярные перевозки тесно связаны с понятием «графика поставок» — совокупности дат поставок груза в соответствующие целевые порты. Для обеспечения возможности моделирования регулярных перевозок в модели принят следующий подход. Сначала проводится формирование набора возможных вариантов грузовместимостей Q судов-газовозов в соответствии со следующей зависимостью:

$$Q = Q_y / n_y, \qquad (2)$$

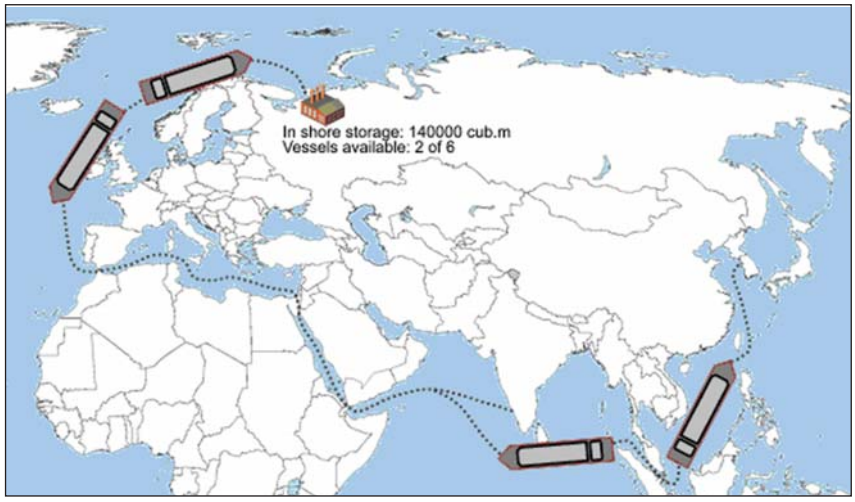

Рис. 1. **Схема моделируемой МТС**

где n_y — целое число поставок, принимаемое из условия попадания значения Q в заданный диапазон (например, Q = 110 000—240 000 м^3).

Согласно зависимости (2), каждой вместимости газовоза Q соответствует определенное число поставок n_y, распределяемое по линиям в соответствии с принятым спросом линий (т. е. принимается, что спрос линий кратен Q). Требуемое число поставок n_y может быть обеспечено с использованием *n* судов, причем величина *n* может варьироваться

Далее на основании принятого n_y для каждой линии строится первоначальный график поставок СПГ, в котором поставки равноудалены друг от друга на временной оси. При этом принимается, что завод СПГ работает 340 сут в году, а оставшиеся 25 сут приходятся на технологический перерыв (т. е. годовые циклы поставок СПГ идентичны). Логика построения графика поставок приведена на рис. 3.

Как следует из рис. 3, зная время готовности первой товарной партии СПГ к погрузке на судно при известном минимальном времени рейса судна в порт назначения, можно определить самое раннее время первой поставки СПГ на линии. Ранее этой даты груз не может быть доставлен. Далее определяется время прочих поставок, исходя из того, что они должны произойти в течение 340 сут для обеспечения согласованности времени работы завода и времени поставок груза, а также для обеспечения возможности доковання судов. Отметим также, что в реальной практике транспортировок СПГ поставка задается не точным значением даты, а некоторым временным окном, продолжительность которого составляет около 6—8 ч. В настоящей работе, ввиду малой длительности окна поставки, а также в целях определенности расчетных алгоритмов, считается, что поставка соответствует конкретному часу.

Многочисленные расчеты показали, что составленный таким образом график поставок приводит к нестабильным и неожиданным результатам: наблюдается нехарактерное изменение критерия экономической эффективности в зависимости от Q, появляются неожиданные выбросы. В результате было установлено, что для корректного сопоставления различных конфигураций МТС необходима оптимизация графика поставок для каждой из сопоставляемых конфигураций. В данной рабо-

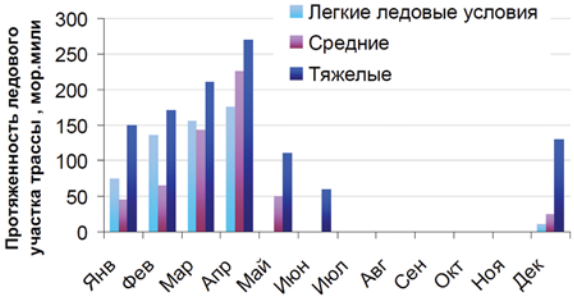

Рис. 2. **Протяженность ледового участка**

[2]Расчет параметров движения судов через лед в данной работе осуществлялся с помощью программы, разработанной Ю. Н. Поляковым.

Рис. 3. **Схема регулярных поставок на одной из линий**

те такая оптимизация производится с помощью одного параметра на каждой линии — отсрочки первой поставки l (см. рис. 3). Перебор значений l_1 и l_2 (по параметру для каждой линии) позволяет найти общий оптимальный график поставок для всей МТС. Необходимо сказать, что различные варианты графика поставок приводят к колебанию критерия экономической эффективности на 15—20%, что сопоставимо с изменением критерия при изменении Q в широком диапазоне и, поэтому, не может не учитываться (см. также рис. 7). В рамках настоящего примера для каждого сочетания грузовместимости Q и числа судов n осуществляется подбор оптимальных значений параметров l_1 и l_2, варьируемых в диапазоне 0—20 сут с шагом 2 сут. Эта оптимизация проводится с использованием экономического критерия путем прямого прогона имитационной модели при заданных Q, n, l_1 и l_2, причем если имеющиеся суда физически не успевают поставить партию СПГ в соответствии с текущим вариантом графика поставок, то такой вариант признается технически неосуществимым и исключается из рассмотрения.

Структура имитационной модели. Товарные партии выполняют роль «заявок» (согласно дискретно-событийному подходу), тогда как суда-газовозы являются «ресурсами», перемещающими заявки по потоковой диаграмме. На рис. 4 приведена упрощенная блок-схема потоковой диаграммы модели МТС, которая состоит из следующих элементов: entitySource — создает заявку в случае, если в рассматриваемый момент времени одновременно имеются свободное судно на рейде порта и товарная партия СПГ в береговом хранилище (объем товарной партии равен вместимости судна); resourcePool — элемент, который представляет собой некий аналог рейда порта и содержит свободные ресурсы, то есть суда-газовозы, не занятые в настоящий момент перевозкой СПГ; resourceSeize — элемент, в котором происходит захват ресурса заявкой, то есть погрузка СПГ на судно-газовоз, при которой из хранилища «изымается» соответствующая товарная партия груза; selectOutput — логический блок распределения груженых судов по линиям в соответствии с принятым графиком поставок; iceDelayLoaded(1,2) — задержка, характеризующая время прохождения ледового участка судном в грузу; delayLoaded(1,2) — задержка, отражающая время хода судна в грузу в порт назначения по чистой воде и зависящая от скорости судна на линии, которая определяется, в свою очередь, графиком поставок; delayBallast(1,2) — аналог delayLoaded для судна в балласте; iceDelayBallast(1,2) — аналог iceDelayLoaded для судна в балласте; releaseResource(1,2) — освобождает ресурс (судно), после оно снова становится доступным в resourcePool и может быть захвачено заявкой; sink(1,2) — уничтожает заявку.

В настоящей модели принимается, что задержки iceDelayLoaded и iceDelayBallast не зависят ни от каких обстоятельств, кроме тяжести ледовых условий, то есть движение каравана ледокол-судно через лед при заданной тяжести ледовых условий осуществляется со скоростью ок. 7—12 уз вне зависимости от того, «опаздывает» ли судно или наоборот «не спешит». Задержки же delayLoaded и delayBallast зависят от мощности на валах судна, т. е. в зависимости от обстоятельств судно может ускоряться, стремясь выполнить график поставок, или, наоборот, снижать скорость, экономя топливо. Указанная зависимость в модели выражается функцией вида «время хода по чистой воде в грузу/балласте — расходы СПГ-топлива в грузу/балласте», которая вычисляется для каждого месяца года при известной продолжительности прохождения ледового участка. Такие вычисления производятся до начала работы модели и объединяются в базу расходов топлива судов. При этом применительно к рассматриваемым судам-газовозам, не имеющим УПСГ, вводится понятие «эквивалентной скорости хода» — скорости, при которой объемы естественных испарений СПГ сравниваются с объемами, потребляемыми ЭУ судна (рис. 5).

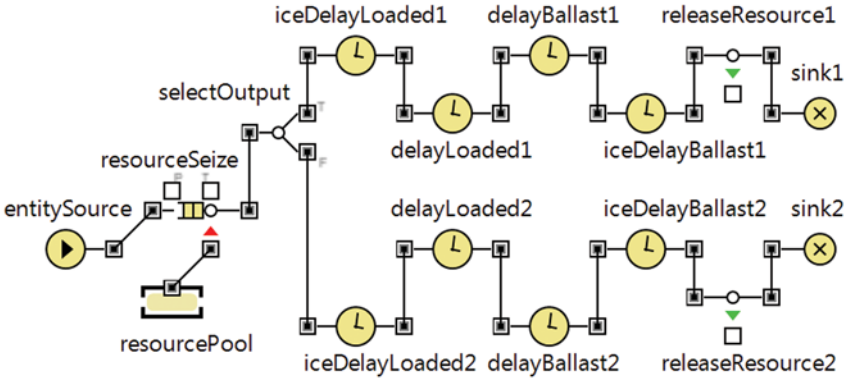

Рис. 4. **Блок схема потоковой диаграммы МТС с двумя линиями**

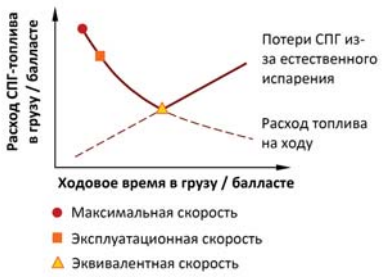

Рис. 5. **Пример зависимости расходов СПГ-топлива от ходового времени**

Движение судна со скоростью, меньшей эквивалентной, нерационально ввиду того, что при этом излишки паров СПГ сжигаются на факельной установке.

Как было отмечено ранее, дискретно-событийное моделирование не позволяет реализовывать логику выбора скорости судами. Без реализации логики выбора судном скоростного режима получить достоверные результаты невозможно. Чтобы преодолеть этот недостаток, в модели применяется следующий подход. Движение балластных судов-газовозов по открытой воде всегда моделируется с максимальной скоростью и, соответственно, максимальными расходами топлива. Это обусловлено тем, что заранее неизвестно, когда потребуется очередное судно для выхода в следующий рейс. После того, как круговой рейс закончился, и судно попало в resourcePool, включается счетчик, определяющий время простоя балластного судна до начала следующего рейса. Это время затем используется для перевычисления ходового времени в балласте и соответствующего уменьшения расходов топлива за прошедший круговой рейс. При этом груженое судно определяет свою скорость, ориентируясь на фактическую требуемую дату поставки по известному массиву данных вида (рис. 5); последующее перевычисление параметров движения судна в грузу не требуется. Такой подход позволяет учесть логику изменения скорости хода судна в балласте, однако, он применим в относительно простых моделях, где не требуется моделирование логики взаимодействия судов.

Помимо описанных основных элементов в модели присутствуют события, определяющие наполняемость хранилища, вспомогательные переменные, а также ряд других вспомогательных параметров и функций. Шаг времени модели равен одному часу.

Оптимизация МТС на основе имитационной модели. В настоящей работе, где число варьируемых параметров относительно невелико, оптимизация МТС производится путем многократных прямых прогонов ИМ, что позволяет наглядно анализировать результаты расчетов. В качестве критерия экономической эффективности (КЭ) приняты удельные суммарные затраты (капитальные и эксплуатационные) на перевозку 1 м^3 СПГ. Капитальные затраты на строительство судов определяются в зависимости от их количества, грузовместимости, ледовой категории; затраты на строительство БРП определяются после моделирования системы в зависимости от полученной расчетной максимальной вместимости БРП. Эксплуатационные затраты, одной из главных составляющих которых являются затраты на топливо, рассчитываются в ходе работы модели.

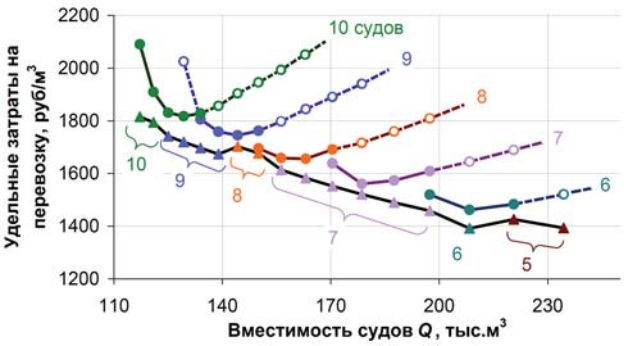

Рис. 6. **Результаты оптимизационного эксперимента:** о — с учетом регулярности поставок; Δ — без учета регулярности

Набор входных данных оптимизационного эксперимента следующий: грузопоток $Q_у$ = 7500 тыс. м^3; дистанции линий — 8000 и 12 000 мор. миль; распределение грузопотока по линиям — 50/50%; ледовые условия — тяжелые; количество поставок в год $n_у$ = 32...64; количество судов n = 6...10. Результаты эксперимента приведены на рис. 6. На этом же рисунке в целях сопоставления приведены результаты расчетов МТС без учета регулярности поставок, то есть с использованием традиционного подхода, основывающегося на «провозоспособности» судна на линии и применяемого при формулировке задачи МП. Эти данные получены для условий, аналогичных условиям регулярных перевозок: аналогичный грузопоток, характеристики судов, модели расчета ходового времени и т. п. При этом фонд эксплуатационного времени судов принимается 340 сут; число судов определяется для каждой линии отдельно путем округления в большую сторону дробного числа судов, полученного, исходя из среднегодовой провозоспособности судна, а затем требуемые количества судов на каждой линии суммируются.

Прокомментируем вначале результаты работы ИМ, а затем сопоставим результаты, полученные в соответствии с двумя рассматриваемыми подходами.

Как можно увидеть из рис. 6, при регулярных перевозках (кривые с маркером «о») у МТС с постоянным количеством судов n имеется выраженный экстремум КЭ. Переход от большего количества судов к меньшему происходит с ростом Q, когда провозоспособность всей МТС возрастает. При этом для первого значения Q, позволяющего снизить n на одно судно, характерны относительно высокие значения КЭ, что обусловлено высокими скоростями движения судов, которые с трудом могут справляться с выполнением графика поставок. Последнее особенно характерно проявилось для конфигурации МТС при Q = 129,3 тыс. м^3 и n = 9, для которой характерно наличие буквально одного возможного варианта графика поставок, в котором, к тому же, движение судов почти всегда происходит на максимальных скоростях. Увеличение же значения КЭ при росте Q выше оптимального значения обусловлено ростом капитальных затрат на систему и появлением простаивающих или неритмично работающих судов (такие варианты выделены на рис. 6 пунктиром).

На рис. 7 приведен пример оптимизации графика поставок для варианта МТС при n = 7. На примере рис. 7 можно увидеть не только степень влияния этой оптимизации на значения КЭ, но и оценить ее значимость для различных конфигураций МТС.

В случае, когда конфигурация МТС (Q = 170,5 тыс. м^3) с трудом обеспечивает требуемые поставки и суда движутся с высокими скоростями, основная масса вариантов графика далека от оптимального, т. е. оптимизация графика наиболее эффективна. В то же время с точки зрения практической эксплуатации такой вариант нельзя назвать хорошим, так как риски несо-

блюдения выбранного оптимального графика достаточно высоки. По мере роста провозоспособности МТС (Q = 187,5 и 197,4 тыс. м^3) скорости судов несколько снижаются, и диапазон изменения КЭ расширяется, так как появляется больше вариантов выполнения графика поставок. При очевидно избыточной провозоспособности МТС (Q = 220,6 тыс. м^3), КЭ становится слабо чувствительным к изменениям графика поставок, большинство вариантов которого приближается к оптимальному. Приводимые рассуждения также наглядно иллюстрируются данными рис. 8, где приведены сведения о скоростном режиме движения судов при n = 7; Q = 170,5 и 220,6 тыс. м^3. Из графика (рис. 8) можно сделать вывод о том, что, будучи привязанными к производительности завода СПГ и не имея возможности доставить груз раньше срока, определяемого графиком, груженые суда ходят, в основном, с умеренными скоростями 16—18 уз. Наблюдается лишь небольшое повышение скоростей хода у судов меньшей вместимости. При этом скоростной режим движения судов в балласте имеет большие различия: суда большей вместимости, работая в ненапряженном графике, движутся со скоростями 10—13 уз, близкими к эквивалентным (в балластном состоянии), а суда меньшей вместимости вынуждены «нагонять» график и ходить с большими скоростями 16—20 уз.

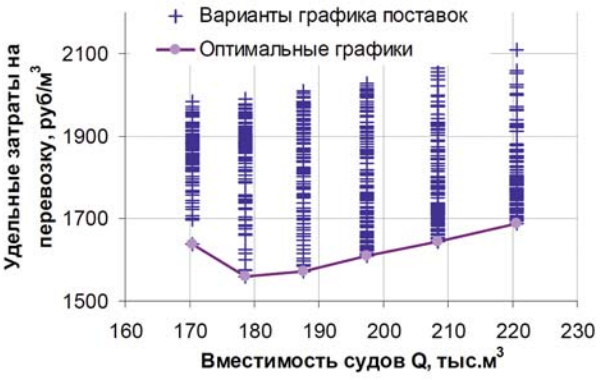

Рис. 7. **Изменение значения КЭ при оптимизации графика поставок в конфигурации МТС при n = 7**

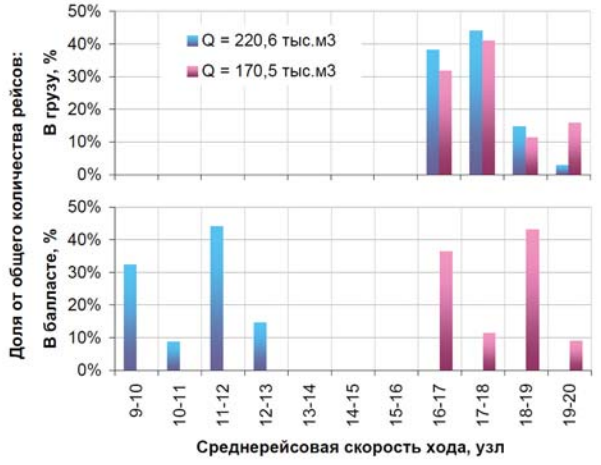

Рис. 8. **Изменение среднерейсовой скорости для конфигураций МТС с различной провозоспособностью при одинаковом количестве судов**

Сопоставим также результаты расчетов по настоящей модели и при использовании традиционного подхода. Из рис. 6 видно, что значения КЭ, в целом достаточно близки, но при регулярных перевозках КЭ несколько выше. Также наглядно видно, что традиционный подход не позволяет точно определять необходимое количество судов. Например, как показывают расчеты по имитационной модели, МТС при Q = 156,3 тыс. м^3 и n = 7 невозможна, а традиционный подход допускает ее существование. Кроме того, пренебрежение регулярностью перевозок приводит к нефизичности результатов. Например, МТС при Q = 129,3 тыс. м^3 и n = 9 существенно менее эффективна, чем МТС при Q = 138,9 тыс. м^3 и n = 9, в то время как традиционный подход дает менее выраженный результат.

Заключение. Рассмотренный пример дискретно-событийной модели МТС, работающей в ледовых условиях с соблюдением графика поставок, позволяет говорить о том, что имитационный подход делает возможным учет требования регулярности поставок груза при определении оптимального состава судов транспортной системы. Игнорирование этого фактора приводит к ошибкам в определении требуемого количества судов, поэтому достоверная оптимизация рассмотренной МТС в условиях, близких к эксплуатационным, возможна только с использованием ИМ.

Требование о регулярности поставок груза является одним из частных случаев, который был рассмотрен в настоящей работе в качестве примера. Для оптимизации многих МТС характерна необходимость учета: взаимодействия судов и ледоколов, периодических докований судов в отдаленных портах, влияния обрастания судов на провозоспособность МТС, а также многих других факторов. Это ведет к необходимости создания агентной имитационной модели МТС, позволяющей учитывать все значимые факторы и максимально приближать условия моделирования и оптимизации МТС к эксплуатационным.

Таким образом, можно сказать, что применение современных методов имитационного моделирования для оптимизации характеристик и состава судов в составе МТС является одним из перспективных направлений развития теории проектирования судов.

Литература

1. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1974.
2. *Пашин В. М.* Оптимизация судов. Л.: Судостроение, 1983.
3. *Соколов В. П.* Постановка задач экономического обоснования судов. Л.: Судостроение,1987.
4. *Зимин А. Д., Дерябина Л. С.* Постановка и особенности решения задачи оптимизации параметров ледокольно-транспортного комплекса. Вопросы судостроения. Серия 1. Проектирование судов, вып. 44, 1985.
5. *Карпов Ю. Г.* Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
6. *Бутов А. С., Кока Н. Г.* Имитационное моделирование работы флота на ЭВМ. М.: Транспорт, 1987.
7. *Бугаев В. Г.* Имитационная модель функционирования флота на арктическом направлении//Современные проблемы проектирования судов. Сб. науч. трудов ЛКИ. 1982.
8. *Бацких Ю. М., Славников А. И.* Создание имитационной модели работы флота в Арктике. Прогнозирование и эффективность работы флота. Сб. науч. трудов ЦНИИМФ, 1985.
9. *Апполонов Е. М., Таровик О. В.* Регрессионно-аналитическая модель определения характеристик газовозов СПГ мембранного типа с различными ледовыми категориями. Судостроение. 2013. № 1.