

СТАНДАРТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ И РАСШИРЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОРТОВЫХ ОПЕРАЦИЙ В ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ МОРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

А.Г. Топаж, О.В. Таровик, С.В. Егоров (Санкт-Петербург)

Введение. Имитационное моделирование становится все более популярным инструментом для комплексного анализа, исследования и оптимизации морских транспортных систем на уровне их предпроектной проработки. Из соображений удобства и скорости разработки большинство подобных прикладных моделей строится в универсальных высокоуровневых средах дискретно-событийного и агентного имитационного моделирования – AnyLogic, ARENA, GPSS. Эти среды содержат большое число стандартных пользовательских компонентов и встроенных решений, существенно упрощающих процесс создания прикладной модели изучаемого объекта из конкретной предметной области. Вместе с тем, специфика описания морской, и, в частности, арктической логистики выдвигает ряд требований, которые требуют расширения стандартных решений, реализованных в базовой поставке промышленных сред разработки ИМ [1]. Результатом данной деятельности может служить создание набора или палитры специализированных законченных модулей, из которых, как из кубиков конструктора, можно достаточно быстро собрать модель любой, сколь угодно сложной и детальной морской транспортной системы.

Процессы, которые определяют сущность системы транспортировки грузов морским транспортом, можно условно разбить на несколько групп: 1) динамика природных внешних условий в области функционирования транспортной системы; 2) динамика грузопотоков [2]; 3) непосредственное движение судов в морских акваториях; 4) управление работой транспортного флота и флота обеспечения [3]; и 5) технологические и вспомогательные операции судов в портах отправления и назначения. В ряде своих предыдущих работ авторами были представлен ряд специальных модулей и компонентов, относящихся к описанию движения судов в нестационарной и гетерогенной среде [4], стохастическому моделированию природных условий на трассах морских переходов и в конкретных географических точках [5], аспектах внедрения в имитационные модели элементов планирования и оперативного управления процессами перевозок [6] и работой ледоколов [7] в арктических транспортных системах. Все соответствующие решения были созданы специалистами ООО «Бюро Гиперборея» и прошли практическую апробацию в рамках работ по модельному исследованию транспортных систем в интересах ведущих коммерческих и государственных компаний, осуществляющих деятельность в арктических регионах России. В качестве основного инструмента разработки моделей в этих проектах нами использовалась среда AnyLogic. В продолжение данного направления в этой статье представлены различные решения, оформленные как отдельные логические модули и предназначенные для описания непрерывных грузовых операций над судами в портах. Эти решения носят универсальный характер и, как представляется, могут быть использованы в широком классе моделей балкерных, нефтяных, и СПГ- терминалов.

Материалы и методы. Прежде всего, опишем два реализованных нами решения, которые расширяют функции стандартных компонентов из палитры процессных и потоковых диаграмм среды имитационного моделирования AnyLogic, позволяя отразить в модели некоторые специфические аспекты обслуживания танкеров в портах погрузки.

Буферное хранилище. Первый из этих аспектов связан с необходимостью адекватного представления в модели общего портового хранилища поставляемого груза о том, что на проектной стадии исследования системы его полная вместимость может быть точно не известна или не задана. Имеющийся в палитре библиотеки потоков AnyLogic© компонент *Резервуар* описывает физическое состояние и поведение замкнутого хранилища жидкого или насыпного груза. Но это хранилище имеет заданную неизменную вместимость и, соответственно, из него нельзя изъять больше вещества, находящегося в нем, или поместить в него больше вещества, чем оно вмещает. Это абсолютно логичные ограничения, но они, в частности, приводят к тому, что когда данный резервуар в ходе исполнения модели переполняется, то входной поток вещества в него автоматически становится равным нулю, то есть субстанция перестает поступать, невзирая на то, какой в модели задана величина текущей интенсивности данного поступления. Но, как правило, в модели, где фокус интереса сконцентрирован в основном на морской транспортировке, этот входной поток определяется внешними (явно заданными) интенсивностями производства груза. Его уменьшение приведет к рассогласованию плановых и фактических грузопотоков. В некоторых случаях резкая динамика грузопотока (полный останов и последующее увеличение интенсивности) противоречит физической сущности процесса. Например, технология добычи нефти выстроена таким образом, что вынужденная резкая остановка добычи является нештатной аварийной операцией.

Это противоречие можно было бы разрешить, задав объем хранилища неограниченно большим, тем самым гарантировав возможность поступления в него любого входного потока. А затем, обработав статистику фактического содержания груза в хранилище на всем протяжении имитационного эксперимента, сделать вывод о том, какой его объем является необходимым для обеспечения непрерывности моделируемого процесса производства. Но, во-первых, при этом теряется возможность визуального наблюдения за уровнем наполнения хранилища в ходе имитационного эксперимента (так как любой уровень наполнения оказывается несоизмеримо ниже заданной огромной фиктивной вместимости, и мы увидим хранилище практически пустым в анимации имитационной модели). А, во-вторых, даже если среди целей модельного исследования стоит задача определения необходимой, статистически обеспеченной вместимости портового хранилища для вывозимого груза, все-таки даже на предпроектном уровне существуют некоторые базовые опорные представления об этой величине. И есть желание провести имитационные эксперименты именно с хранилищем заданного номинального объема, дав, однако, возможность неограниченного приема груза в него согласно заданному расписанию интенсивности без какой-либо потери. Для этих целей сотрудниками ООО «Бюро Гиперборея» разработан простой пользовательский компонент *буферное хранилище*, внутренняя структура которого представлена диаграммой на рис. 1.

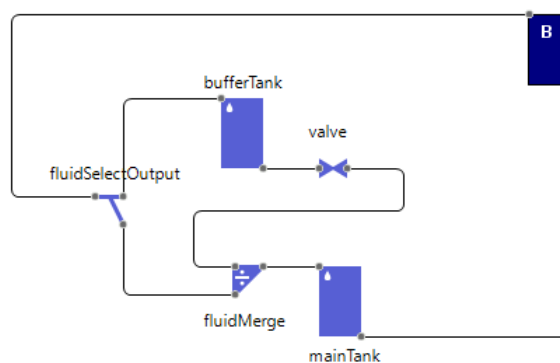


Рис. 1. Внутренняя структура пользовательского компонента *буферное хранилище*

Структура данного компонента состоит из двух резервуаров, соединенных между собой трубопроводами по схеме «слив-перелив». Основной рабочий резервуар соответствует исходному проектному хранилищу с заданной номинальной вместимостью. Из него и только из него осуществляется выпуск хранящейся субстанции. Второй резервуар представляет собой фиктивное буферное хранилище очень большой вместимости, соединенное с основным резервуаром трубопроводом с вентилем *valve*, обеспечивающим сколь угодно большую скорость протекания жидкости через него. В то же время, направление движения входного потока определяется разветвляющим вентилем *fluidSelectOutput*, логика работы которого элементарна – входной поток субстанции заданной внешней интенсивности направляется в основной резервуар, когда в нем есть свободное место, и в буферный – когда основной резервуар полностью заполнен. Таким образом, данная схема позволяет реализовать следующие аспекты поведения системы хранения:

- данная система всегда способна принять в себя любой входной поток вещества заданной интенсивности (которая, в данном случае, равна интенсивности производства продукта);
- текущий объем вещества в основном хранилище всегда меньше или равен его номинальной вместимости и может быть адекватно отображен в анимации модели;
- весь не принятый основным хранилищем объем поступающего вещества аккумулируется в буферном хранилище и расходуется из него по мере освобождения основного. Таким образом, весь произведенный груз будет обработан и рано или поздно вывезен;
- статистические показатели динамики наполненности буферного хранилища (доля времени в опустошенном или частично заполненном состоянии, максимальный уровень заполнения и т.д.) дают полную информацию для анализа и выработки рекомендаций о желательном изменении проектной вместимости основного хранилища по сравнению с опорным номинальным значением.

Хранилище с произвольным числом подключаемых стоков. Иногда при построении имитационной модели отгрузочного порта необходимо предусмотреть такой вариант его конфигурации, когда имеется одно общее хранилище груза в порту и, соответственно, один источник его пополнения (внешний процесс производства), а число каналов стока, которые могут работать одновременно, заранее неизвестно. Например, это соответствует случаю, когда количество причалов отгрузки подбирается динамически в ходе работы модели. В этом случае невозможно заранее нарисовать однозначную универсальную замкнутую схему входных и выходных потоков из портового хранилища, и вместо этого предлагается для описания динамики его состояния использовать гибкую «разомкнутую» схему с искусственной синхронизацией интенсивностей одновременной погрузки и разгрузки, которая легко масштабируется на любое произвольное число потенциальных стоков. Идея этого подхода демонстрируется на рис. 2.

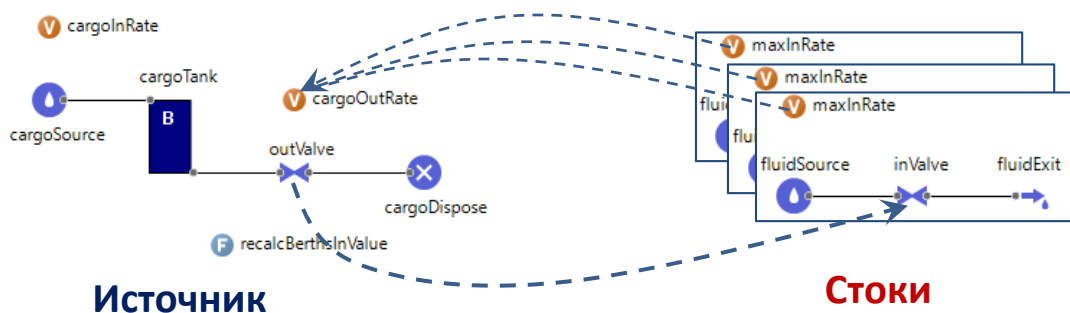


Рис. 2. Реализация хранилища с динамически подключаемыми стоками

Скорость поступления вещества в портовое хранилище (в данном случае реализованное как описанный выше буферный резервуар) задается явно как переменная *cargoInRate*. Для проектов вывоза углеводородов ее величину можно интерпретировать как интенсивность их производства на прилегающих месторождениях. Скорость же его опустошения (за счет учета процессов погрузки судов на разных терминалах) определяется более сложным способом и регулируется вентилем *outValve*. Он ограничивает максимальную скорость истечения вещества из резервуара, которая определяется динамически как сумма максимальных потенциальных интенсивностей погрузки для всех подключенных в данный момент стоковых компонентов. Эта максимальная скорость истечения, которая хранится в специальной переменной *cargoOutRate*, зачастую может быть больше фактических модельных значений, например, в случае, когда резервуар полностью пуст, и скорость погрузки ограничена скоростью производства.

Полученный «разомкнутый» контур производства-потребления предполагает необходимость очень строгого контроля соответствия выходного потока диаграммы на уровне источника и входных потоков диаграмм на уровне потребителей. Это управление реализовано следующим образом – каждое изменение интенсивности выходного потока через вентиль *outValve*, в свою очередь, является триггером, запускающим функцию *recalcBerthsInValue()*, которая пробегает по всем агентам-потребителям и пропорционально синхронизирует интенсивности входных потоков соответствующих диаграмм с изменившейся величиной интегрального выходного потока из общего источника. Это происходит путем выставления максимальной скорости потока через управляющий клапан *inValve* в каждом стоке, при том, что скорость входного потока в компоненте *fluidSource* полагается неограниченной. Таким образом, согласно данной схеме подключенные стоки определяют *максимальную* скорость истечения вещества из хранилища-источника, а *фактическая* скорость этого истечения, наоборот, задает текущие *фактические* скорости потоков вещества в агентах-потребителях.

Далее перечисляются и описываются разработанные нами решения, которые используются в имитационных моделях морских транспортных систем для моделирования процесса грузообработки транспортных судов в портах перевалки.

Перевалочный комплекс. Данный компонент представляет собой укрупненное описание плавучего перевалочного комплекса (ППК), которое может быть использовано в качестве отдельного блока в стандартной процессной диаграмме движения агентов-заявок, под которыми в данном случае понимаются транспортные суда. На практике подобный комплекс представляет собой стационарный резервуар, закрепленный на якорях в удобном месте портовой акватории и снабженный инструментами для погрузки и выгрузки жидкого или насыпного груза. При этом выгрузка в хранилище ППК груза арктическими судами-челноками и погрузка с него судов фидерного флота могут осуществляться одновременно (чаще всего с разных бортов танкера-накопителя, играющего роль ППК).

Структура разработанной подмодели ППК описывается смешанной процессно-потоковой диаграммой, представленной на рис. 3.

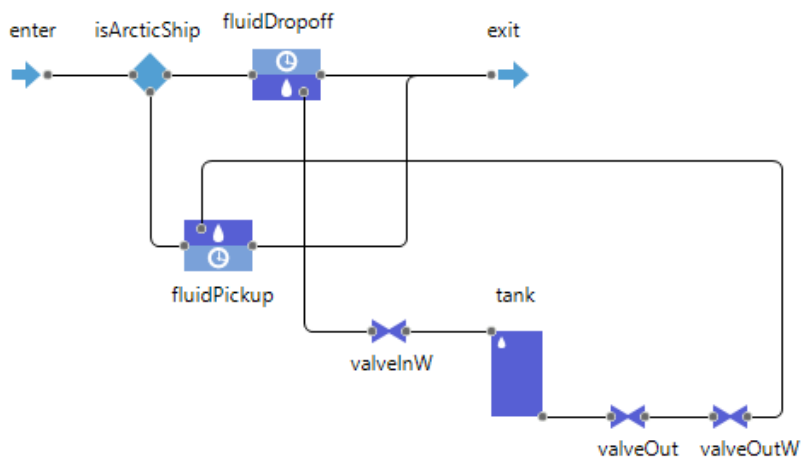


Рис. 3. Диаграмма обработки судна у перевалочного комплекса

Видно, что в этой диаграмме присутствуют как элементы стандартной библиотеки моделирования процессов, так и диаграммы моделирования потоков, а их связь между собой обеспечивается «интеграционными» компонентами *fluidPickUp* и *fluidDropoff*. Ветка диаграммы, содержащая компонент *fluidPickUp*, активируется в случае, когда заявка-агент соответствует судну-фидеру. При этом агент, проходя через блок, забирает жидкость в заданном количестве, поэтому, по прибытии агента в блок, тот начинает накапливать вещество через свой «потоковый» порт. А ветка, содержащая компонент *fluidDropoff*, становится рабочей тогда, когда заявка-агент это арктический челнок. Агенты, проходя через подобный блок, наоборот, оставляют вещество в заданном объеме. Предполагается, что каждый агент содержит определенный объем жидкости, который нужно выгрузить, и, по прибытии агента, блок начинает выгрузку через «потоковый» порт, задерживая агента до тех пор, пока не сольется все вещество, после чего выпускает агента через порт выхода, чтобы тот продолжил выполнять свою задачу. Входным резервуаром для *fluidPickUp* или, соответственно, выходным резервуаром для *fluidDropoff* в этом случае выступает один и тот же физический резервуар, отвечающий хранилищу груза данного ППК, а интенсивность поступления или истечения субстанции регулируется специальными управляющими вентилями. При этом в интерфейсе модели может быть отображен как уровень наполнения общего хранилища ППК (через виджет, связанный с логическим компонентом *tank*), так и степень выполнения конкретного процесса погрузки-выгрузки, то есть степень наполнения или опустошения соответствующего судового хранилища (через виджеты, связанные с логическими компонентами *fluidPickUp* или *fluidDropoff*).

Модуль оперативного планирования перевалки. Перевалочный порт может содержать не один, а несколько перевалочных комплексов. В случае достаточно интенсивного грузопотока наличие нескольких терминалов перевалки является обязательным условием для того, чтобы перевалочный порт не стал «бутылочным горлышком» всей транспортной системы. При этом в логике построения имитационной модели возникает отнюдь не тривиальная задача – выбрать для очередного приходящего судна оптимальный перевалочный комплекс среди нескольких, формально свободных и подходящих в настоящий момент. Дело в том, что одной из задач модельного исследования часто выступает получение

рекомендаций о минимально необходимой портовой инфраструктуре, в том числе – о рациональном числе перевалочных комплексов в каждом порту перевалки. Естественно, это предполагает, что в модели должна найти отражение некая здравая логика управления причальными комплексами (попытка минимизации числа используемых ППК, исключение длительных простоев судов и ППК с имеющимися запасами груза и т.д.) В данном случае оказывается недостаточным положиться на внутреннюю логику последовательности перебора свободных ресурсов и захвата первого подходящего из них, которая по умолчанию реализована в движке AnyLogic. И задача выбора наиболее подходящего ресурса с использованием неких встроенных алгоритмов интеллектуальной диспетчеризации должна решаться непосредственно в логике имитационной модели [8].

Одним из способов назначения конкретного перевалочного комплекса для разгрузки транспортному судну (арктическому челноку) или, наоборот, для погрузки транспортному судну-фидеру может быть алгоритм, основанный на решении задачи комбинаторной оптимизации. В этом случае мы не пытаемся последовательно определять лучший перевалочный комплекс для каждого отдельного, вновь пришедшего в порт перевалки, судна, основываясь на каких-то предопределенных правилах приоритета. Вместо этого в определенные моменты времени составляется общий и единый план операций для всех судов, попадающих в горизонт планирования – как тех, что уже находятся в порту перевалки и ждут назначения себе конкретного терминала для погрузки или разгрузки, так и тех, которые ожидаются в порту через некоторое время. При этом критерием оптимизации является наиболее быстрое обслуживание всех попавших в горизонт плана судов, т.е. минимизация суммарного времени их портовых операций. Далее полученный план исполняется в ходе модели, то есть суда подходят именно к назначенным им перевалочным комплексам и именно в том порядке, который предписан в текущем плане. Ниже описаны основные моменты реализации подобного модуля оперативного планирования перевалки и его интеграции в имитационную модель транспортной системы.

В качестве внешнего движка или внешнего сервиса оперативного комбинаторного планирования в данном решении была выбрана библиотека *OptaPlanner*. Этот универсальный решатель представляет собой набор программных средств, предназначенных для решения широкого круга задач комбинаторной оптимизации. Следует также отметить, что библиотека *OptaPlanner* представляет собой высокоуровневую надстройку над стандартным синтаксисом языка *Java*, которая позволяет описать конкретную задачу или предметную область в привычных терминах. Согласно этому подходу сущность оптимизационной проблемы технически выражается в специальном аннотировании тех или иных классов информационной модели, то есть указании того, какие ассоциативные связи (переменные планирования) для экземпляров каких сущностей (объектов планирования) должны варьироваться и подбираться из предопределенных наборов вариантов для достижения заданного критерия качества всей системы. При этом основной работой, выполненной для подключения внешних алгоритмов комбинаторной оптимизации к имитационной модели, является создание адаптера решаемой задачи, то есть сведения описания предметной области к сущностям и терминологии используемого решателя. Соответствующая информационная модель для задачи планирования перевалки представлена ниже на рис. 4.

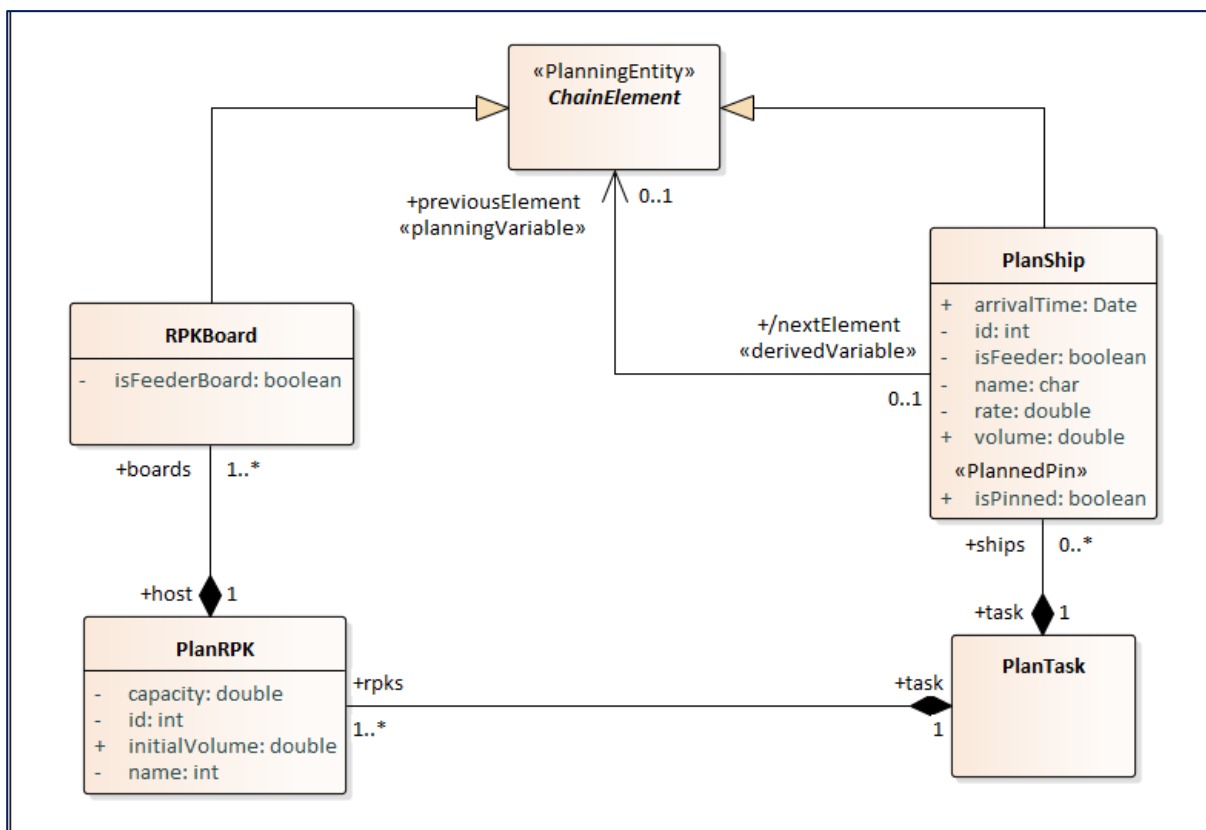


Рис. 4. Объектная модель задачи планирования перевалки

Корневым компонентом данной информационной модели является класс «PlanTask», то есть вся задача планирования. Он инкапсулирует в себе все информационные описания предметных сущностей задачи, статических связей между ними (те, которые предполагаются заданными и не подлежат варьированию) и определяет те динамические связи, которые будут переменными в задаче оптимизации, то есть должны быть установлены таким образом, чтобы обеспечить наилучшее значение того или иного интегрального критерия качества решения задачи. В частности, для описываемой задачи в роли этих сущностей выступают:

1. Перечень транспортных судов (как арктических челноков, так и фидеров), то есть экземпляров класса «PlanShip», которым должны быть назначены перевалочные комплексы и определена последовательность обработки на них;
2. Перечень перевалочных комплексов данного порта перевалки по конкретному грузу, то есть экземпляров класса «PlanRPK»;
3. Каждый экземпляр класса «PlanRPK» содержит перечень причальных мест (вложенный массив объектов класса «RPKBoard»), на которых может производиться грузообработка судов с ограничением «не более одного судна на одном причальном месте в один момент времени». Так, роль этих причальных мест могут играть борта плавучего перевалочного комплекса, то есть каждый ППК имеет один борт для приема арктических судов-челноков и другой борт для приема судов-фидеров. Но в общем случае семантика и количество причальных мест могут быть произвольными.

Согласно введенным понятиям, конкретный план перевалки должен представлять собой назначение тем или иным судам их причальных мест и указание последовательности, в которой суда должны занимать одно и то же причальное место, которое оказалось им назначено. Для формализации этого в информационной модели использована технология описания очередей или цепочек элементов,

отображаемая верхней частью диаграммы на рис. 4. Было принято, что суда и причальные места являются наследниками абстрактного класса «ChainElement» (звено цепи). При этом каждый экземпляр класса «PlanShip» может содержать указатель на единственный предшествующий элемент содержащей его цепи типа «ChainElement». Если этот предшествующий элемент судно, то это означает, что текущее судно должно быть обслужено после предшественника и на том же причальном месте, что и предшественник. И только для первого в очереди на обслуживание на конкретном причальном месте судна член класса *previousElement* указывает на объект класса «RPKBoard», то есть на само это причальное место и, тем самым, на перевалочный комплекс. Обратный конец описанной ассоциативной связи *nextElement* является вычисляемым и указывает, наоборот, на следующий элемент цепочки, которая всегда должна начинаться с экземпляра «RPKBoard» и представляет, таким образом, однозначно упорядоченную очередь судов, которые должны быть обслужены на данном причальном месте. Таким образом, описание непротиворечивого варианта плана (согласно принятой технологии) должно представлять собой несколько цепочек элементов, каждая из которых начинается с объекта «RPKBoard» и содержит последовательно несколько элементов «PlanShip» (см. демонстрационный рис. 5). При этом некоторые суда теоретически могут не принадлежать ни к одной цепочке (это означает, что в рамках текущего плана они не успевают быть обслужены), а некоторые причальные места могут не породить никаких цепочек клиентов (это означает, что в рамках текущего плана они не задействованы).

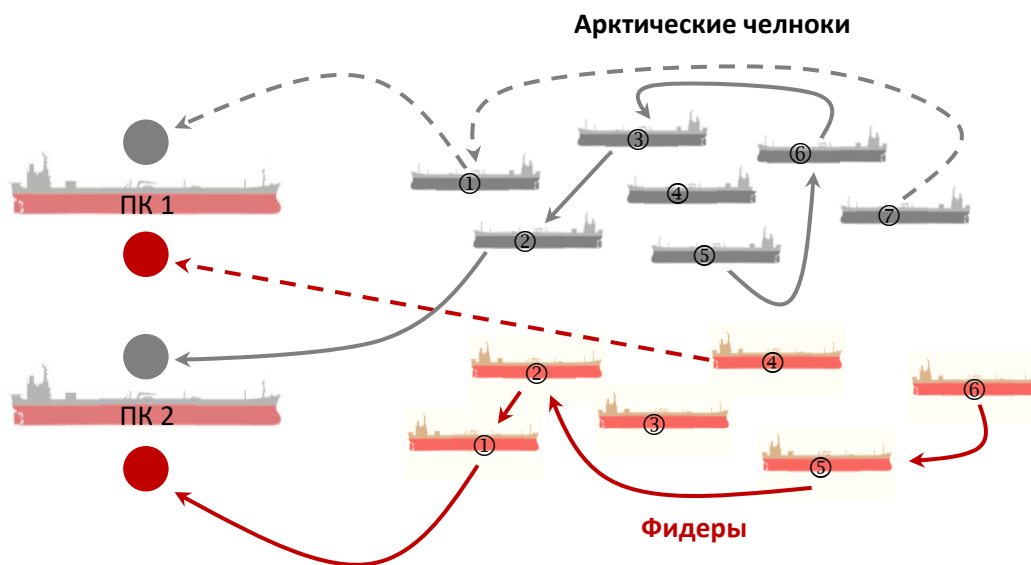


Рис. 5. Пример описания цепочек заданий в информационной модели плана перевалки

Отметим, что формализация плана грузопераций в виде цепочки упорядоченных обслуживаний судов на конкретном причальном месте сильно напоминает по постановке классическую транспортную задачу (VRP – Vehicle Routing Problem) или задачу коммивояжера [9]. Можно сказать, что «челночный» и «фидерный» борты каждого перевалочного комплекса выстраивают свои собственные маршруты обхода клиентов – транспортных судов соответствующего типа с целью минимизации общего времени их обслуживания. Разница с классической постановкой VRP здесь, однако, состоит не только в том, что на самом

деле движутся клиенты, а не центры обслуживания, а еще и в том, что отдельные маршруты причальных мест одного ПК нельзя рассматривать независимо друг от друга, то есть вне контекста соображений об ограниченности объема общего хранилища, к которому они присоединены.

Последний шаг, который необходимо сделать для замыкания постановки задачи – это имплементировать в коде прокси-класса описания текущего варианта решения «PlanTask» специальный унаследованный метод для вычисления критерия качества этого решения в терминах понятий созданной информационной модели. Общие принципы, согласно которым производится оценка качества конкретного плана перевалки в реализованном решении таковы:

- вычисляемый критерий представляет собой набор двух числовых показателей, первый из которых показывает степень удовлетворения данным планом необходимых логических ограничений, а второй – условный коэффициент полезности, приписываемый ему. При сравнении двух планов приоритет всегда отдается тому из них, для которого первый элемент критерия больше (план должен быть логически непротиворечив) и только для планов, имеющих одинаковое значение первого показателя, осуществляется дополнительно сравнение по второму элементу;

- для вычисления критерия качества проводится анализ цепочек заданий, начинающихся со всех причальных мест в разрезе каждого перевалочного комплекса отдельно, и для каждого такого кортежа цепочек выстраивается последовательность (временная развертка) упорядоченных событий, изменяющих состояние данного ПК. То есть происходит прогнозирование динамики выполнения погрузочно-разгрузочных операций на каждом ПК на временном горизонте планирования. Событиями, меняющими состояние, (то есть характерными точками на оси времени) для ПК могут быть начало или конец обработки очередного челнока или фидера, а также полное наполнение или полное опустошение хранилища груза (при этом соответственно прерывается течение операций разгрузки или погрузки очередного судна). В ходе подобного «прогнозного проигрывания» динамики перевалки определяется время начала и окончания операций грузообработки для всех судов в цепочке, а также проверяется выполнение логических ограничений;

- в случае, невыполнения естественных логических ограничений (появление зацикленных контуров в цепочке обслуживаемых судов, наличие цепочек, не начинающихся с причального места или содержащих причальное место в середине, несоответствие типа судна типу причального места и т.п.) анализ событий для данного ПК немедленно прекращается, а первый элемент критерия качества уменьшается на заданное число штрафных баллов;

- в случае если полный анализ цепочек для всех ПК не выявил нарушения логических ограничений (анализируемый план логически непротиворечив), второй элемент интегрального критерия качества вычисляется как взвешенная сумма времен обработки всех судов, взятая с обратным знаком. При этом вес каждого судна определяется временем его ожидаемого прибытия – логично постулировать, что требование скорейшего обслуживания более актуально для ранее прибывших судов, так как задания для более поздних судов с большой вероятностью все равно будут изменены на следующих тактах перепланирования.

Результаты и обсуждение. Описанные в статье компоненты и решения программно реализованы в виде замкнутых блоков или библиотек, готовых к вставке в произвольные имитационные модели, разрабатываемые в среде AnyLogic. В частности, они успешно использовались в нескольких моделях, созданных сотрудниками ООО «Бюро Гиперборея» по заказу крупных коммерческих кампаний. Это модель транспортного снабжения разведывательного бурения газоконденсатных

месторождений в Обско-тазовской губе, модель перспективного развития Мурманского балкерного терминала, имитационная модель транспортно-технологической системы вывоза нефти и сжиженного природного газа с морского терминала «Порт бухта Север».

В частности, в рамках последней работы в логике имитационной модели было реализовано три альтернативных механизма управления процессом перевалки и выполнено их сравнение на тестовых примерах. В первом варианте – назначение перевалочного комплекса очередному судну, пришедшему в порт перевалки, происходит случайным образом, то есть выбирается первый подходящий по формальным признакам ППК, встреченный в процессе перебора. Во втором – выбор ППК для данной заявки (судна) реализован непосредственно в коде модели и опирается на некоторые здравые предопределенные правила приоритета, то есть соответствует некому «жадному» ситуативному алгоритму. И, наконец, в третьем случае используется описанный выше модуль построения оптимального оперативного плана для всех заявок на ограниченном временном горизонте. Сравнение этих подходов позволяет сделать следующие предварительные выводы.

Ситуативный алгоритм, основанный на последовательном назначении лучшего ППК каждому вновь приходящему судну, сравним с алгоритмом назначения случайного ППК в плане быстрой реакции. Но его работоспособность сильно зависит от сравнительной вместимости ППК и использующих его транспортных судов (фидеров и арктических челноков). Так, например, если объем хранилища ППК меньше вместимости и челнока и фидера, то такой ППК никогда не будет назначен для перевалки, хотя она и физически возможна при их одновременной обработке на выгрузку одного и погрузку другого (по сути, перевалка «борт-в-борт», но через хранилище-посредника). Дело в том, что при этом ни одно из судов оказывается формально не в состоянии «сделать первый шаг» (поскольку объем груза или свободного места в хранилище всегда меньше судовой партии), а простой ситуативный алгоритм ориентируется только на текущее состояние системы и не обладает предикативными возможностями как полноценные алгоритмы комбинаторного планирования. Исследования показали, что адекватная работа предложенного алгоритма ситуативного назначения ППК достигается в том случае, когда объем одного перевалочного комплекса более чем в два раза превышает максимальную вместимость каждого из обслуживаемых судов. Сравнение некоторых выбранных показателей эффективности тестовой транспортной системы для этого случая приведено в таблице. В этом примере рассматривалась поставка СПГ из бухты Север в Роттердам с перевалкой в Мурманске при наличии в составе флота двенадцати арктических челноков вместимостью 170000 м³ и восьми газозово-фидеров вместимостью 250000 м³. Хранилище СПГ в бухте Север полагалось неограниченно полным, то есть транспортная система имела возможность вывозить максимально возможное для данной конфигурации количество груза, что должно наглядно проиллюстрировать влияние метода планирования перевалки на грузопоток системы. Сравнение производилось для различных конфигураций перевалочного порта в Мурманске – от 1 до 10 перевалочных комплексов объемом 520 000 м³ каждый.

Можно заметить, что для рассмотренного случая эффективность использования сложного и ресурсозатратного алгоритма комбинаторного планирования перевалки оказывается незначительной в смысле улучшения средних показателей портозахода. Для вариантов с малым количеством ППК ситуативный алгоритм дает результаты, а незначительная выгода от оперативного комбинаторного планирования наблюдается лишь для вариантов, когда вследствие годовой нерегулярности портозаходов в системе

временно образуются «лишние» ППК, требующие интеллектуального подхода к их использованию. Однако при применении квазиоптимального плана всегда повышается устойчивость и стабильность процедуры портовых операций, так как и максимальное время задержки судна в порту перевалки и разброс соответствующего распределения всегда оказываются существенно меньше, чем для альтернативных вариантов.

Сравнение трех методов управления процессом перевалки в имитационной модели вывоза СПГ (ОП – оперативное планирование, СА – ситуационный алгоритм, СН – случайное назначение перевалочного комплекса)

Число ППК	Метод	Показатели эффективности транспортной системы					
		Объем вывоза СПГ (млн т в год)	Число судозаходов в порт	Время судна в порту (ч)			
				Среднее	Мин.	Макс.	Ст. Откл.
1	ОП	21.8	494	112.8	24	450	69
	СА	22.2	501	109.5	24	878	84
	СН	21.9	493	112.2	24	639.2	75
2	ОП	27.4	620	49.1	24	449	47
	СА	28.3	638	43	24	434	40
	СН	27	612	50.7	24	381	49
3	ОП	27.9	633	44.9	24	248	32
	СА	28.6	645	39.2	24	218	26
	СН	26.7	601	50.6	24	3617	155
5	ОП	29	650	37	24	328	30
	СА	28.7	643	37	24	457	38
	СН	25.2	566	61.7	24	4838	284
10	ОП	30.1	671	30	24	244	15
	СА	29.2	654	31.7	24	578	41
	СН	23.8	530	75	24	5435	321

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Проект № 23-19-00039 «Теоретические основы и прикладные инструменты для создания системы интеллектуального планирования работы флота и поддержки принятия решений в арктическом судоходстве»).

Литература

1. **Буянов А.С., Гончарова А.Н.** Особенности формирования морских транспортно-логистических систем в условиях Арктики // Сборник научных трудов АО «ЦНИИМФ». 2020. С. 58–67.
2. **Ольховик Е.О., Афонин А.Б., Тезиков А.Л.** Информационная модель морских транспортных потоков Северного морского пути // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2018. Т.10. № 1. С. 97–105.
3. **Малыханов А.А., Черненко В.Е.** Имитационное моделирование логистики снабжения арктических буровых платформ // Труды седьмой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015). 2015. С. 210–213.
4. **Топаж А.Г., Таровик О.В.** Имитация движения судов в пространственно-неоднородной и нестационарной среде в дискретно-событийной парадигме моделирования морских транспортных систем // Сборник трудов Шестой международной научно-практической конференции ИКМ МТМТС-2021. М.: Издательство «Перо», 2021 С.133–138.
5. **Май Р.И., Таровик О.В., Топаж А.Г.** Моделирование морской погоды как входного сигнала имитационных моделей транспортных и экологических систем в арктическом регионе // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. 29. № 3. С. 20–38.
6. **Топаж А.Г., Таровик О.В., Бахарев А.А.** Автоматическая маршрутизация судов во льдах: постановка задачи и инструменты решения // Арктика: экология и экономика. 2022. Том 12. №1. С. 121–139.
7. **Топаж А.Г., Егоров С.В., Буянов А.С., Карпенко А.А., Малыханов А.А.** Планирование работы ледокольного флота в имитационных моделях морских арктических транспортных систем // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности (ИММОД-2021). 20–22 октября 2021 г., Санкт-Петербург: АО «ЦТСС», 2021. С. 396–411
8. **Fu M.C.** Optimization for Simulation: Theory vs. Practice // INFORMS Journal on Computing. Vol. 14, No. 3, Summer 2002, P. 192–215
9. **Toth P., Vigo D.** (eds). The Vehicle Routing Problem. Monographs on Discrete Mathematics and Applications. 2002. Vol. 9. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.