

АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В УПРАВЛЕНИИ ЛОГИСТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В НЕФТЯНОЙ ОТРАСЛИ

Е.Г. Серова, Д.О. Шкляев (Санкт-Петербург)

Введение. Практика показывает, что проведение натурального эксперимента является одним из лучших способов определения свойств объекта (в том числе и в логистике). Это связано с тем, что при проектировании/моделировании многие факторы учесть сложно, расчет проводится по усредненным данным, изменяются условия внешней среды и др. Вместе с тем очевидно, что проведение натурального эксперимента возможно далеко не всегда. Использование современных методов и инструментов моделирования позволяет экспериментировать с системами тогда, когда делать это на реальном объекте невозможно, нецелесообразно или экономически невыгодно.

Цель исследования, которому посвящена данная статья – обосновать применение имитационного моделирования, в первую очередь агентного, при управлении логистическими процессами в нефтяной отрасли.

Теоретической основой исследования послужили работы отечественных и зарубежных ученых, специалистов в области системного анализа, моделирования, менеджмента, организации производства и структуризации производственных систем. Методологической основой исследования стал системный подход. Для решения поставленных задач применялись методы агентно-ориентированного имитационного моделирования и общей теории систем.

Обзор литературы. Исследование проблем, которые существуют в управлении логистическими процессами нефтяной отрасли, базируется на теоретических концепциях системного анализа, опирающегося на такие научные теории, как теория исследования операций и общая теория управления. Выводы основываются на теории производственного менеджмента в управлении цепями поставок [1–4] и теории управления запасами [5].

Методы и инструменты моделирования чрезвычайно популярны, и множество публикаций отечественных и зарубежных исследователей посвящены раскрытию понятия моделирования, классификации и характеристикам моделей, примерам применения в различных областях знаний (см., напр.: [6–16]). В работах [17–20] рассматриваются основы и типизация видов имитационного моделирования и их применение в управлении, приводится хронология исследований в области имитационного моделирования, раскрываются понятия «агентное моделирование», «системная динамика» и пр. При этом необходимо понимать, что имитационная модель сложной системы управления должна по возможности отображать все основные факторы и взаимосвязи, характеризующие реальные ситуации, критерии и ограничения. Модель должна быть достаточно универсальной, чтобы описывать близкие по назначению объекты, и в то же время достаточно простой, чтобы позволять выполнять необходимые исследования с разумными затратами. Среди потенциальных эффектов применения методов и процедур имитационного моделирования выделяются: рационализация решения задач с помощью внедрения математических методов обработки данных; высвобождение работников среднего звена и привлечение их к выполнению других задач организации; экономия времени на принятие решений [19].

В настоящее время самым распространенным методом имитации и технологией распределенного искусственного интеллекта, безусловно, является агентное

моделирование. Это одна из современных парадигм моделирования, при которой модели используются для исследования децентрализованных систем, динамика и функционирование которых определяются не глобальными правилами и законами, а наоборот, эти правила и законы являются результатом индивидуальной активности членов группы [21]. В работе [22], посвященной практике применения систем распределенного искусственного интеллекта, автор выделяет следующие четыре характеристики для успешного применения агентного подхода: сложность (комплексность), модульность, децентрализованность, вариативность.

Авторы статьи [23], доказывая преимущества использования искусственного интеллекта в цепи поставок, подчеркивают, что мультиагентные системы позволяют разрабатывать модели цепочек поставок, которые обладают распределенностью, автономностью и обеспечивают возможность противостоять изменениям.

Мультиагентные системы – системы распределенного искусственного интеллекта. В агентном моделировании поведение системы складывается из взаимосвязей множества агентов, каждый из которых обладает определенными особенностями поведения. Согласно одному из наиболее полных определений, агент должен обладать следующими характеристиками: 1) идентифицируемость, т.е. агент обладает набором свойственных ему характеристик и принципов, определяющих его поведение и процесс принятия решений; 2) автономность и принятие решений с учетом взаимодействия с другими агентами, действуя при этом независимо; 3) наличие определенной цели, оказывающей влияние на его поведение; 4) самообучаемость [24]. Агентное моделирование включает в себя разработку модели поведения для каждого из агентов.

Создание агентной модели – это в большей степени описательный процесс. Для получения результата исследователь описывает, как компоненты системы взаимодействуют между собой. Во многих случаях легче описать компоненты системы, чем определить накопители, потоки и петли обратной связи [25]. Любая многоагентная система состоит из следующих основных компонентов: множество организационных единиц, в котором выделяется подмножество агентов и объектов; множество задач; среда, т.е. некоторое пространство, в котором существуют агенты и объекты; множество отношений между агентами; множество действий агентов (например, операций над объектами) [26].

Метод моделирования может быть выбран исходя из следующих критериев [25]:

- если существует много отдельных объектов, целесообразнее использовать агентное моделирование;
- если имеется информация только об общих взаимосвязях, целесообразнее использовать системную динамику;
- если систему удобнее описать как процесс, целесообразнее использовать дискретно-событийное моделирование.

Еще одним понятием, которое все больше используется в литературе, являются «цифровые двойники». Цифровой двойник – это подробная имитационная модель реального объекта или системы, которая использует данные в реальном времени для прогнозирования динамики развития системы [27], [28]. Ключевые характеристики цифрового двойника: 1) он всегда представляет реально существующий объект; 2) он представляет реальное состояние объекта (например, температура, скорость) [27].

Снижение затрат на вычисления и развитие процедур и методов моделирования помогли развитию цифровых двойников, но существует и ряд проблем, препятствующих их повсеместному внедрению:

1) необходим большой массив данных для поддержания цифрового двойника в актуальном состоянии на срок его эксплуатации. Цифровые двойники тесно связаны с Интернетом вещей (IoT), благодаря которому подключенные к модели устройства передают необходимые данные для их обработки и аналитики;

2) построить цифрового двойника довольно сложно.

Примером цифрового двойника может служить цифровой двойник цепочки поставок. В этом случае необходимо смоделировать операции по хранению и распределению продукции. При моделировании этих операций могут потребоваться разные подходы. Также существует зависимость от программного обеспечения. При этом сведение к минимуму количества программных платформ, используемых для создания и эксплуатации цифрового двойника, поможет оптимизировать его поддержку, обслуживание и дальнейшее развитие [27].

Агентно-ориентированное имитационное моделирование погрузочно-разгрузочного процесса на морском виде транспорта. В настоящее время в нефтяной отрасли используются практически все логистические технологии, которые были разработаны по мере развития экономики и усложнения технико-технологических систем, но имеются также и особенности. Во-первых, многофункциональная логистика в нефтяных компаниях отвечает за формирование логистических схем совместно с буровыми, строительными, перерабатывающими предприятиями, а также монополистами в сфере транспортного обеспечения. Часто в логистике нефтяной отрасли приходится принимать решения, не имея сети дорог, складских помещений, а также в условиях монополии на транспортировку продукции со стороны ОАО «РЖД» и ПАО «Транснефть». В результате логистический функционал в нефтяной отрасли может быть ограничен [29]. Во-вторых, нефтяная отрасль производит до 180 различных материалов, полуфабрикатов, конечных товаров. В процессе производства конечный продукт может переходить из одной фазы в другую не один раз. В этой связи логистические технологии, используемые в процессе передвижения материального потока от скважины до конечного потребителя, отличаются большим разнообразием [29]. Схематично логистическая цепь в нефтяной промышленности представлена на рис. 1.

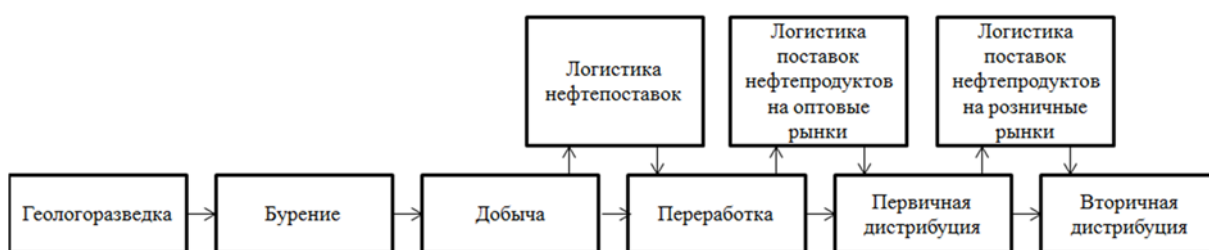


Рис. 1. Логистическая цепь в нефтяной промышленности (адаптировано по [29])

Основная цель первичной дистрибуции – транспортировка нефтепродуктов с нефтеперерабатывающих заводов до первого пункта перевалки (нефтебаза, порт, аэропорт и др.). Основная цель вторичной дистрибуции – транспортировка нефтепродуктов с пункта перевалки до конечной точки назначения (например, АЗС).

При рассмотрении вопросов применения методов имитации при моделировании процесса отгрузки и транспортировки грузов (нефтепродуктов) предлагается использовать имитационную среду AnyLogic – инструмент,

охватывающий основные направления моделирования: дискретно-событийное, системную динамику, динамические системы и агентное моделирование. Это программное обеспечение обладает рядом преимуществ: позволяет учесть все ограничения модели и рассмотреть сложные системы в динамике; обеспечивает возможность применения для решения реальных задач и оценки последствий при внесении изменений в модель и, как следствие, в реальную жизнь. К основным недостаткам можно отнести большие трудозатраты на создание модели и необходимость обучения работе в среде AnyLogic. Базовая концепция AnyLogic заключается в том, что модель описывается набором параллельно функционирующих и взаимодействующих активностей, где объект имеет свое собственное функционирование и взаимодействие с окружением. Графическая среда в AnyLogic может поддерживать следующие процессы: проектирование; разработку; документирование модели; выполнение экспериментов.

В нефтяной отрасли типичными задачами, для решения которых разрабатываются имитационные модели, являются:

- планирование операций, расписания технического обслуживания, маршрутов и размещения транспорта и оборудования;
- оптимизация производства, минимизация простоев;
- транспортировка нефтяной продукции с помощью железнодорожного, морского и автотранспорта;
- управление хранилищами и учетом всех необходимых условий и требований;
- проектирование сети трубопроводов;
- анализ и тестирование процессов на нефтеперерабатывающих заводах.

В науке и практике логистики известны примеры разработки имитационных моделей для нефтяной отрасли. Например, для Новопортовского месторождения ПАО «Газпром нефть» специалистами Крыловского государственного научного центра в 2015 году была разработана система морской транспортировки нефти. Нефть с данного месторождения поступает по 100-километровому трубопроводу к морскому терминалу, который расположен у мыса Каменный (Обская губа), откуда нефть перевозится до потребителей на арктических танкерах. Главная проблема при организации морских перевозок – это тяжелые ледовые условия, которые затрудняют судоходство, так как большую часть времени движение судов в Обской губе происходит по 500 километровой канале в неподвижном льду толщиной более двух метров. В открытой части Карского моря дрейфующие льды в период с ноября по март полностью покрывают акваторию моря. Для создания надежной системы морской транспортировки необходимо было решить следующие задачи:

- разработать постоянную схему вывоза нефти: на данном этапе требовалось определить необходимое количество судов, а также понять, потребуется ли привлечение ледоколов; также необходимо было провести расчеты затрат на топливо для танкеров и затрат на фрахт ледоколов в годы с ледовыми условиями разной тяжести;
- спроектировать временную схему вывоза нефти: необходимо было определить пропускную способность системы в переходный период на время использования танкеров малой грузоподъемности и их последующей замены на танкеры большей грузоподъемности;
- определить необходимую вместимость берегового резервуарного парка: следовало провести расчет минимального объема берегового хранилища нефти, достаточного для всего периода освоения месторождения [27].

Для решения указанных выше задач Крыловским государственным научным центром было разработано решение для проектирования морских транспортных систем. Под единым интерфейсом были объединены модули ГИС-среды, судостроительных расчетов и логистическая имитационная модель, построенная в AnyLogic, что позволило при расчетах одновременно учитывать логику транспортных операций, характеристики судов и природные условия. Суда в системе были представлены как агенты. При этом модель учитывала принципы взаимодействия танкеров с ледоколами и логику выбора скорости судна в зависимости от наполненности хранилища, тяжести ледовых условий, положения других судов, температуры воздуха и прочих факторов [27].

В результате применения технологии имитационного моделирования была спроектирована транспортная система Новопортовского месторождения с учетом смерзания ледового канала, динамики движения судов и наполнения хранилищ. В ходе проекта был определен объем берегового хранилища, достаточный в ледовых условиях разной степени тяжести. С помощью модели было оценено необходимое количество ледовых каналов, рассчитаны ориентировочные даты их прокладки и определены сроки и объемы ледокольной поддержки танкеров. Также была спланирована работа транспортной системы по временной схеме, т. е. с использованием малых танкеров слабого ледового класса [27].

Одной из классических моделей работы погрузо-разгрузочного процесса на морском виде транспорта является погрузо-разгрузочный процесс на выносных причалах. Пример такой модели, разработанной в среде AnyLogic, представлен на рис. 2.



Рис. 2. Визуальное изображение работы морского терминала в ПО AnyLogic

Данная модель состоит из: танкеров для перевозки нефти и нефтепродуктов; буксиров, устанавливающих танкеры под погрузку; железнодорожных эстакад для погрузки и разгрузки нефти и нефтепродуктов; резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. Логика работы модели представлена на рис. 3 и в табл. 1.

Описание работы модели

№	Элемент	Описание
1	Погрузка/разгрузка нефти и нефтепродуктов железнодорожным транспортом	<p>Включает:</p> <ul style="list-style-type: none"> • одну двухстороннюю железнодорожную эстакаду для отгрузки светлых нефтепродуктов; • одну двухстороннюю железнодорожную эстакаду для отгрузки темных нефтепродуктов; • четыре состава, которые могут отгружаться одновременно. <p>Каждый состав может перевозить только один вид топлива. Каждый состав прибывает на определенную железнодорожную эстакаду в зависимости от типа перевозимой продукции</p>
2	Хранение	<p>Резервуары могут хранить две группы нефтепродуктов: темные и светлые. Резервуары могут перерабатывать четыре различных типа топлива: дизельное топливо, бензин, мазут и сырую нефть. Имеется четыре резервуарных парка, по одному на каждый вид топлива. Каждый резервуар для хранения может содержать только один вид топлива. Каждый резервуар имеет две разные системы трубопроводов: одна для отгрузки топлива, а другая – для прокачки топлива в резервуар для хранения</p>
3	Танкеры и буксиры	<p>Танкер подходит к причалу (с помощью буксиров) и остается у причала до полной выгрузки всех танков. Каждый танк может содержать только один вид топлива. По завершении выгрузки топлива танкер вытаскивают из причала буксирами. Затем он отправляется от терминала</p>

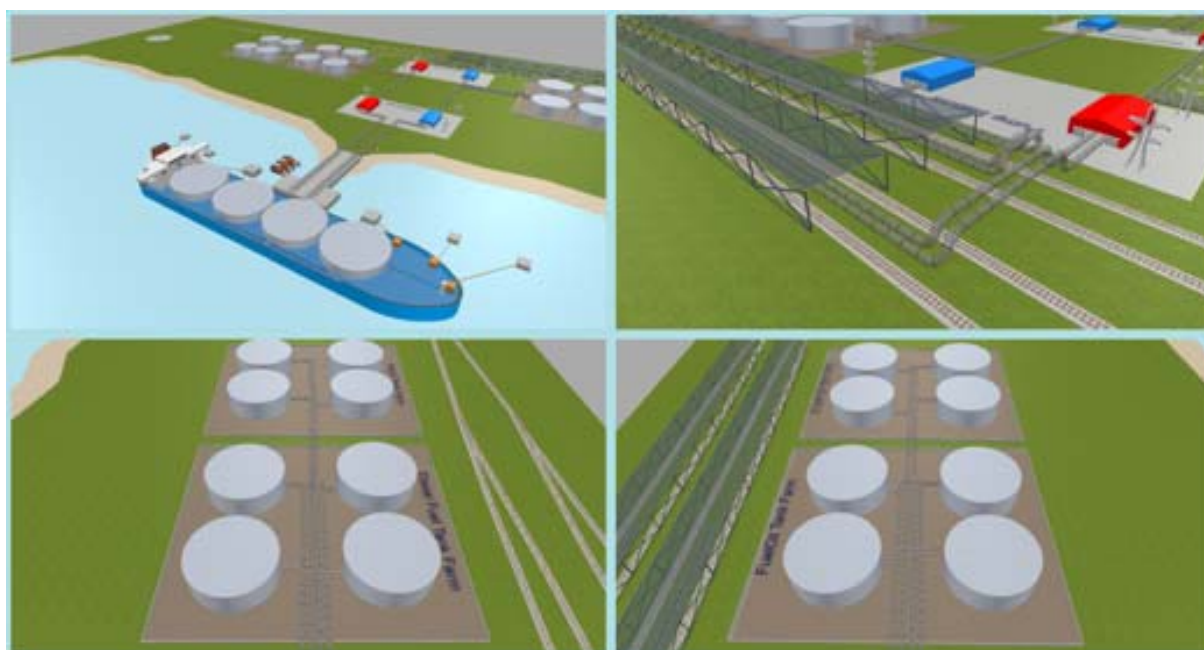


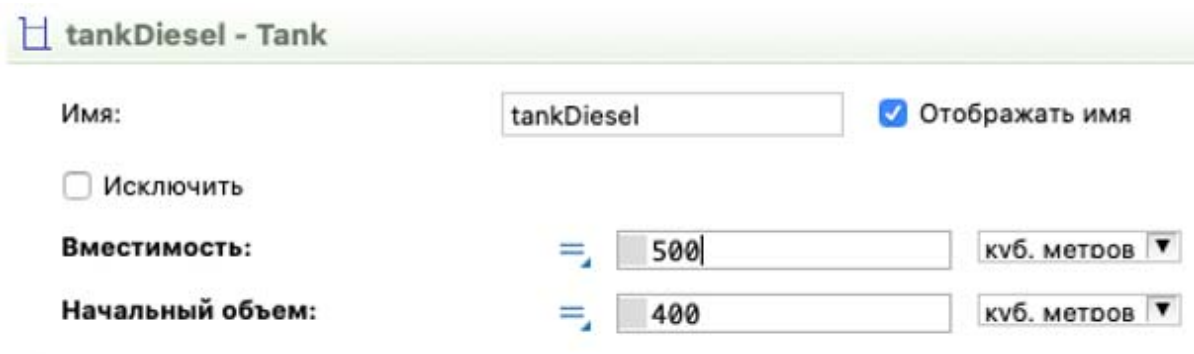
Рис. 3. Детальное визуальное изображение работы морского терминала в ПО AnyLogic

После добычи и вывоза с месторождения нефть доставляется на нефтеперерабатывающие заводы. Таким образом, возможно рассмотреть следующий пример агентного моделирования в AnyLogic: модель цепочки поставок нефти. Модель разработана в среде ГИС. Агентами являются танкеры, резервуары (для нефти), нефтепроводы, нефтеперерабатывающие заводы, нефтепродуктопроводы, резервуары (для нефтепродуктов) и бензовозы. У каждого из них есть свои уникальные параметры (например, емкость, скорость и т. д.). Модель состоит из: 4 танкеров; 4 резервуаров (для нефти); 4 нефтепроводов; 4 нефтеперерабатывающих заводов; 32 нефтепродуктопроводов; 32 резервуаров (для нефтепродуктов); 41 бензовоза.

Описание проведенных экспериментов и анализ полученных результатов.
В рамках исследования был проведен ряд экспериментов с целью подтвердить корректность работы модели.

Агент: Резервуар («tankGas95», «tankGas92», «tankDiesel»).

1. В случае увеличения объема резервуаров с 30 м³ до 500 м³, а также при увеличении изначального объема заполнения резервуаров до 400 м³, бензовоз для слива топлива не приезжает в течение значительно более долгого времени в сравнении с изначально установленными значениями (рис. 4).



Имя: tankDiesel Отображать имя

Исключить

Вместимость: 500 куб. метров

Начальный объем: 400 куб. метров

Рис. 4. Интерфейс AnyLogic при проведении эксперимента № 1

2. В случае снижения объема резервуаров с 30 м³ до 4 м³, а также при снижении изначального объема заполнения резервуаров до 0 м³, формируется очередь из автомашин в связи с отсутствием топлива на автозаправке: иными словами, возникает дефицит топлива на автозаправке (рис. 5 и 6).



Имя: tankGas95 Отображать имя

Исключить

Вместимость: 4 куб. метров

Начальный объем: 0 куб. метров

Рис. 5. Интерфейс AnyLogic при проведении эксперимента № 2

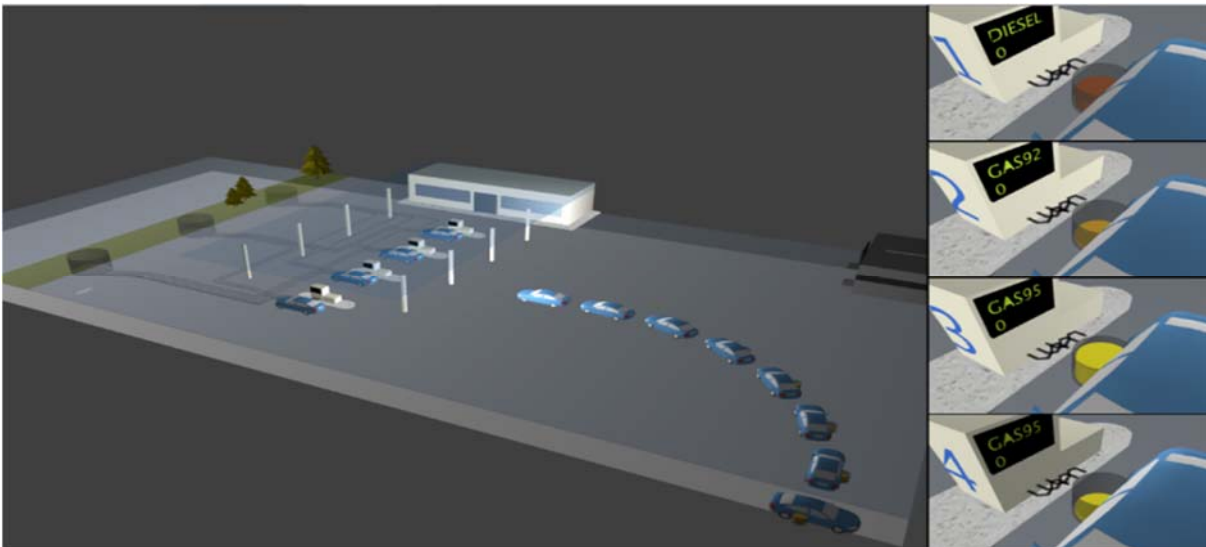


Рис. 6. Результаты эксперимента № 2

Агент: Бензоколонка («fuel dispenser»). 3. В случае снижения пропускной способности трубопровода подачи топлива, а также раздаточного пистолета до 0, происходит ошибка, ведущая к сбою работы модели: действительно, для чего держать открытой неработающую заправку (рис. 7)?

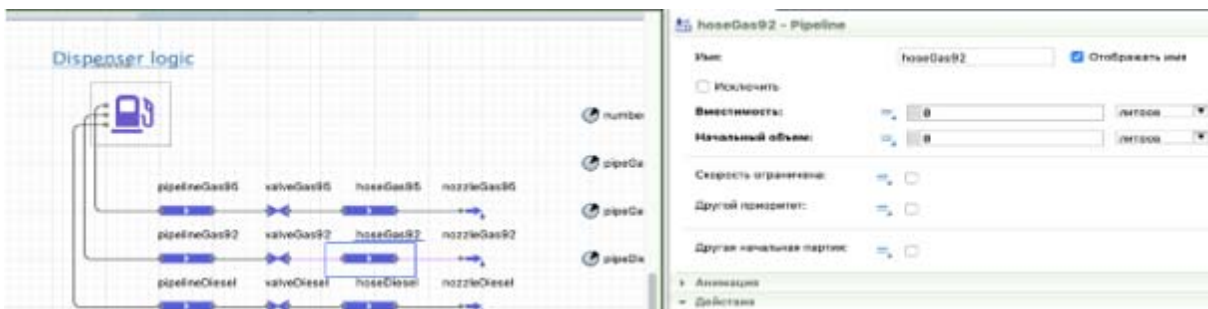


Рис. 7. Интерфейс AnyLogic при проведении эксперимента № 3

Агент: Бензовоз («gasoline tanker»). 4. В случае увеличения скорости слива топлива в резервуар с 25 л/с до 150 л/с очевидно, что резервуар наполняется быстрее: это значительно снижает вероятность возникновения дефицита на автозаправке (рис. 8).

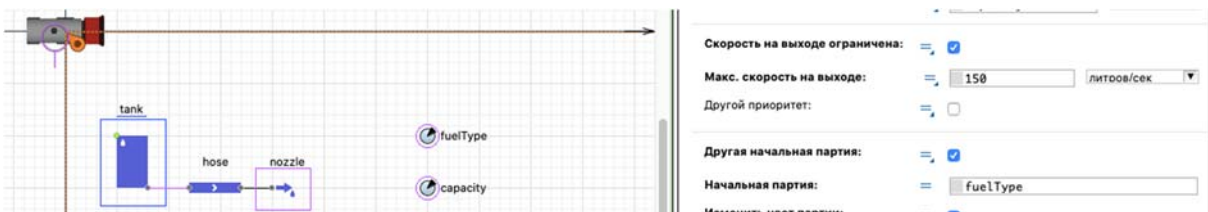


Рис. 8. Интерфейс AnyLogic при проведении эксперимента №4

Агент: Потребитель (машины, приехавшей на заправку) («tank»). 5. В случае снижения объема вместимости бензобака до 2 л, а также в случае условия изначально заполненного бензобака на 2 л, происходит ошибка, ведущая к сбою работы модели:

действительно, для чего приезжать на заправку в случае, если бензобак автомобиля полон (даже если это всего 2 л) (рис. 9).



Рис. 9. Интерфейс AnyLogic при проведении эксперимента № 5

6. В случае повышения уровня изначально заполненного бензобака практически до уровня максимальной вместимости заправка автомобиля происходит практически мгновенно.

Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты эксперимента

№	Эксперимент	Результат
1	Увеличение объема резервуаров с 30 м ³ до 500 м ³ , увеличение изначального объема заполнения резервуаров до 400 м ³	Бензовоз для слива топлива не приезжает в течение значительно более долгого времени по сравнению с изначально установленными значениями
2	Снижение объема резервуаров с 30 м ³ до 4 м ³ , снижение изначального объема заполнения резервуаров до 0	Возникает дефицит топлива на автозаправке
3	Снижение пропускной способности трубопровода подачи топлива, а также раздаточного пистолета до 0	Ошибка, ведущая к сбою работы модели
4	Увеличение скорости слива топлива в резервуар с 25 л/с до 150 л/с	Вероятность возникновения дефицита на автозаправке снижена
5	Снижение объема вместимости бензобака до 2 л, заполнение бензобака на 2 л	Ошибка, ведущая к сбою работы модели
6	Повышение уровня заполнения бензобака практически до уровня его вместимости	Заправка автомобиля происходит почти мгновенно

Результаты применения инструментов и методов имитационного моделирования подтверждают, что агентное моделирование может успешно применяться на всех этапах цепочки поставок в нефтяной отрасли:

1. *Вывоз добытой нефти.* Агентное моделирование применяется для проектирования транспортной системы месторождения с учетом погодных условий и ледовой обстановки. При проектировании транспортной системы возможно

определить объем резервуарного парка, количество единиц транспорта для вывоза нефти, конфигурацию погрузо-разгрузочных устройств.

2. *Поставка добытой нефти на нефтеперерабатывающие заводы и отгрузка нефтепродуктов с нефтеперерабатывающих заводов.* Агентное моделирование применяется для проектирования производственно-логистической инфраструктуры по приему нефти, определения объема резервуарного парка для нефти и для нефтепродуктов, а также для выбора целевой производственно-логистической инфраструктуры по отгрузке нефтепродуктов в различные виды транспорта с учетом текущих и перспективных потребностей в сбыте готовой продукции.

3. *Доставка нефтепродуктов до АЗС.* Агентное моделирование применяется для определения производственно-логистической системы работы АЗС, включая необходимое количество единиц транспорта для доставки нефтепродуктов на АЗС и конфигурацию распределительных колонок с учетом текущих и перспективных потребностей в реализации нефтепродуктов конечным потребителям.

Заключение

Технологии Индустрии 4.0, в том числе интеллектуальные технологии, могут быть применены при решении как стратегических задач, связанных с логистикой и цепями поставок в нефтяной отрасли, так и на операционном уровне. Результаты проведенного исследования позволяют сделать вывод о том, что менеджмент логистических процессов в нефтяной индустрии может быть успешно осуществлен с помощью многоагентных систем – систем распределенного искусственного интеллекта. При интеграции многоагентной системы в структуру нефтяной компании решаются следующие задачи сложной многофункциональной логистики:

- повышение эффективности принимаемых управленческих решений;
- увеличение гибкости и адаптации к изменениям внешней среды в условиях увеличения рисков и роста конкуренции;
- управление развитыми транспортными сетями и погрузо-разгрузочными операциями.

В качестве программного обеспечения, используемого для моделирования, в исследовании применялась среда AnyLogic. Рассмотрен пример разработки имитационной модели для вывоза арктической нефти Новопортовского месторождения, работы морского отгрузочного терминала, функционирования цепи поставок. Приведено описание агентной модели работы АЗС, проведена серия экспериментов, получены и проанализированы результаты.

В данной работе представлена только часть цепочки поставок топлива от нефтеперерабатывающего завода до конечного потребителя. Дальнейшее исследование будет посвящено разработке и эксплуатации модели для отгрузки нефтепродуктов с нефтеперерабатывающего завода.

Литература

1. **Aquilano N.J., Chase R.B., Davis M.L.** Fundamentals of Operations Management. USA, Homewood: Richard D. Irwin, Inc., 1991.
2. **Bowersox D.J., Closs D.J.** Logistical Management. The Integrated Supply Chain Process. USA, New York: The McGraw-HILL Companies, INC, 2001.
3. **Chopra S., Meindl P.** Supply Chain Management. Strategy, Planning & Operations. 3rd ed. USA: Pearson Prentice Hall, 2007.
4. **Harrison A., Hoek R., Skipworth H.** Logistic Management and Strategy: Competing Through the Supply Chain. 5th ed. UK: Person Educational Limited, 2014.

5. **Land M.J., Thürer M., Stevenson M., Fredendall L.D., Scholten K.** Inventory diagnosis for flow improvement – A design science approach. *Journal of Operations Management*, 2021. 67 (5): 560–587.
6. **Антонов А.В.** Системный анализ. М.: Высшая школа, 2004.
7. **Лукинский В.С.** Модели и методы теории логистики: Учебное пособие. 2-е изд. Санкт-Петербург: Питер, 2008.
8. **Емельянов В.В., Ясиновский С.И.** Имитационное моделирование систем. М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2009.
9. **Боев В.Д., Кирик Д.И., Сыпченко Р.П.** Компьютерное моделирование: пособие для курсового и дипломного проектирования. Санкт-Петербург: ВАС, 2011.
10. **Садовничий В.А., Акаев А.А., Коротаев А.В., Малков С.Ю.** Моделирование и прогнозирование мировой динамики. М.: ИСПИ РАН, 2012.
11. **Кобелев Н. Б., Девятков В.В., Половников В.В.** Имитационное моделирование. М.: ИНФРА-М, 2013.
12. **Кричевский М.Л., Серова Е.Г.** Бизнес-анализ и принятие управленческих решений на основе данных и моделей. Теория, практика, инструменты. СПб.: Профессиональная литература, 2016.
13. **Pidd M.** *Computer Simulation in Management. Science.* 5th ed. Chichester: John Wiley and Sons, 2004.
14. **Sterman J.** *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World.* USA, New York: McGraw-Hill Education, 2000.
15. **Albright S.C., Zappe C.J., Winston W.L.** *Data Analysis, Optimization, and Simulation Modeling.* Canada: South-Western Cengage Learning, 2011.
16. **Serova E.** The role of agent based modelling in the design of management decision processes. *Journal Information Systems Evaluation*. 2013. 16 (1): 74–84.
17. **Карпов Ю.Г.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб: БХВ-Петербург, 2005.
18. **Борщев А.В.** Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика, *Exponenta PRO*. 2004. 7–8 (3–4): 38–47.
19. **Серова Е.Г.** Имитационное моделирование в современном менеджменте // Сборник докладов Третьей всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности Имитационное моделирование. Теория и практика. Санкт-Петербург: ФГУП ЦНИИТС, 2007. С. 215–220.
20. **Каталевский Д.Ю.** Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении. М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015.
21. **Лукинский В.С., Серова Е.Г.** Методы и инструменты интеллектуального анализа данных в цифровой логистике и управлении цепями поставок // *Логистика и управление цепями поставок*. 2018. 87 (4): 73–80.
22. **Parunak H.V.D.** Industrial and practical applications of DAI. In: G. Weiss (ed.). *Multiagent Systems: A Modern approach to Distributed Artificial Intelligence.* USA, Cambridge, MA: MIT Press; 1999. Pp. 337–421.
23. **Pino R., Fernández I., de la Fuente D., Parreño J., Priore P.** Supply chain modelling using a multi-agent system. *Journal of Advances in Management Research*. 2010. 7 (2): 149–162.
24. **Macal C., North M.** Tutorial on agent-based modeling and simulation // *Journal of Simulation*, 2010. 4 (3): 151–162.

25. **Gorod A., Hallo L., Ireland V., Gunawan I. (eds.).** Evolving Toolbox for Complex Project Management. USA, Boca Raton: CRC Press, 2020.
26. **Serova E.** Agent based modeling for business solutions // Proceedings of the Distributed Intelligent Systems and Technologies Workshop DIST'2011. St. Petersburg: St. Petersburg State Polytechnical University, 2011. С. 55–62.
27. AnyLogic. An Introduction to Digital Twin Development. Official website. URL: <https://www.anylogic.ru/resources/white-papers/an-introduction-to-digital-twin-development/>; «Газпром нефть» проектирует системы морской транспортировки нефти в Арктике. Официальный сайт. URL <https://www.anylogic.ru/simulation-modeling-of-offshore-offloading-system-for-arctic-oil-and-gas-condensate-field/> (дата обращения 19.07.2021).
28. **Ma J., Chen H., Zhang Y., Guo H., Ren Y., Mo R., Liu L.** A digital twin-driven production management system for production workshop // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. 110 (5/6): 1385–1397.
29. **Щербанин Ю.А.** Логистика и трейдинг в нефтегазовой отрасли. В 2 книгах. Кн. 1. Основы логистики. Закупки и поставки в нефтегазовых логистических системах. М.: Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина, 2015.