

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА
ИМЕНИ И.М. ГУБКИНА

На правах рукописи

Крылова Ольга Валерьевна

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ СХЕМ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ НА
ТРУДНОДОСТУПНЫЕ ОБЪЕКТЫ СТРОИТЕЛЬСТВА НЕФТЕГАЗОВОЙ
ОТРАСЛИ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации» (промышленность) (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Степин Ю.П.

Москва – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Анализ методов и моделей транспортной логистики и постановка задачи оптимизации выбора транспортных схем доставки грузов в нефтегазовой отрасли.....	13
1.1. Методы и модели транспортной логистики.....	13
1.2. Задача формирования оптимальных транспортных схем доставки грузов в составе проекта строительства объекта.....	17
1.2.1. Характеристика и особенности факторов, влияющих на процесс доставки в нефтегазовой отрасли	20
1.3. Постановка задачи оптимизации формирования оптимальных транспортных схем.....	27
1.3.1. Применение методов стохастического программирования для учета факторов неопределенности.....	37
1.3.1. Применение имитационных моделей для учета факторов неопределенности.....	40
1.3.3. Представление в стохастической форме (адаптивная схема решения) оптимизационной задачи формирования оптимальных транспортных схем.....	43
Выводы к главе 1.....	51
Глава 2. Разработка моделей и алгоритмов оценки и анализа рисков задачи оптимизации выбора транспортных схем доставки грузов в нефтегазовой отрасли.....	53
2.1. Принципы анализа рисков и факторы риска.....	53
2.2. Модель и алгоритм (принципы) оценки и анализа рисков при оптимизации схем доставки грузов.....	55
2.2.1. Постановка многокритериальной оптимизационной задачи формирования транспортных схем с учетом рисков.	61
2.3. Модель анализа рисков изменения проектных решений и	

построения адаптивной схемы доставки грузов.....	69
2.3.1. Постановка задачи.....	69
2.3.2. Характеристики процесса стратегического управления.....	73
2.3.3. Построение адаптивной стратегии выбора маршрутов с учетом эволюции внешней среды.....	75
Выводы к главе 2.....	81
Глава 3. Построение имитационной модели задачи оптимизации выбора транспортных схем доставки грузов в нефтегазовой отрасли....	83
3.1. Анализ принципов имитационного моделирования, выбор методологии для поставленной задачи.....	83
3.1. Описание методологии системной динамики.....	87
3.2. Структурная схема имитационной модели процесса доставки грузов на отдаленные и труднодоступные объекты строительства.....	88
3.3.1. Элементы логистической сети.....	88
3.4. Разработка имитационной модели системной динамики доставки грузов на отдаленные и труднодоступные объекты строительства.....	90
Выводы к главе 3.....	111
Глава 4. Реализация моделей и алгоритмов выбора оптимальных транспортных схем доставки грузов в нефтегазовой отрасли.....	113
4.1. Разработка структуры компьютерной системы поддержки принятия решений для формирования оптимальных транспортных схем доставки грузов на труднодоступные объекты строительства.....	113
4.2. Пример формирования оптимальных транспортных схем доставки с использованием разработанных алгоритмов.	119
4.2.1. Описание логистической сети рассматриваемой задачи.....	119
4.2.2. Реализация разработанных алгоритмов.....	127
Выводы к главе 4.....	139
Заключение.....	141
Литература.....	143

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. В настоящее время в Российской Федерации строительство большого количества крупных, первоочередных объектов газовой отрасли планируется и ведется в отдаленных регионах страны (на п-ове Ямал, Дальнем Востоке, арктическом шельфе и пр.) с особыми природными и сложными инфраструктурными условиями, вдали от крупных транспортных магистралей. Такие проекты требуют поставок большого количества материально-технических ресурсов (МТР) в течение длительного времени.

Согласно действующим нормативным актам проектная документация на объекты капитального строительства производственного назначения должна содержать раздел «Проект организации строительства». В этом разделе должны быть отражены в том числе: характеристика района расположения объекта строительства, условий строительства и оценка развитости транспортной инфраструктуры, а также *описание транспортной схемы (схем) доставки материально-технических ресурсов.*

Указанные условия транспортировки МТР определяют значительные трудности создания эффективной транспортной схемы (схем). Эти трудности определяются с одной стороны структурной сложностью и многозвенностью схем транспортировки, а с другой неопределенностью и сложностью получения исходных данных на этапе проектирования, их вероятностным характером, неточностью и неполнотой, а также рисками перерасхода ресурсов и срыва сроков строительства.

Доставка грузов на объект в соответствии с графиком строительства с минимальными затратами – одно из условий эффективности строительства в целом. Определить маршруты перевозки, распределение грузопотоков по ним а также оптимальные сроки отправки грузов важно как с точки зрения оптимизации затрат по доставке, так и для своевременного обеспечения строительства материальными ресурсами.

Учитывая объемы затрат на транспортировку МТР, важность своевременного строительства крупных нефтегазовых объектов, а также невозможность проведения экспериментов с рассматриваемой системой транспортировки ввиду ее масштаба и сложности актуальной является задача обоснованного выбора – оптимизации транспортных схем доставки грузов в условиях недостатка информации, с учетом факторов неопределенности и риска. В настоящее время не существует отработанных методов формирования оптимальных схем доставки грузов в труднодоступные регионы строительства объектов нефтегазовой отрасли, которые бы системно учитывали указанные факторы. Этим определяется актуальность разработки методов, моделей и алгоритмов для принятия управленческих решений в области формирования оптимальных схем доставки грузов, с учетом сложности транспортных систем, в условиях неопределенности и риска.

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности процесса доставки МТР в отдаленные и труднодоступные регионы строительства за счет исследования и разработки моделей и алгоритмов поддержки принятия управленческих решений, позволяющих формировать оптимальные транспортные схемы доставки грузов, обеспечивающие возможность формирования экономически и функционально обоснованного плана транспортировок с учетом факторов неопределенности и риска процесса транспортировки, а также рисков возможного изменения плана строительства.

Для достижения указанной цели решаются следующие задачи:

- Анализ факторов, влияющих на процесс доставки грузов в труднодоступные районы строительства объектов нефтегазовой отрасли, структурной сложности транспортных систем для таких объектов; существующих методов и моделей транспортной логистики; методов и алгоритмов учета факторов неопределенности и риска при решении оптимизационных задач.

- Построение структуры компьютерной системы поддержки принятия решений (КСППР) на базе использования методов и моделей оптимизации, имитационного моделирования, анализа рисков, теории Марковских случайных

процессов для оптимизации формирования транспортных схем доставки грузов на отдаленные и труднодоступные объекты строительства нефтегазовой отрасли с учетом факторов неопределенности и риска.

- Разработка оптимизационной модели и алгоритма формирования транспортных схем доставки грузов в условиях неполной, неточной и вероятностной информации, а также с учетом взаимосвязей переменных задачи и динамики функционирования системы транспортировки.

- Разработка имитационной модели системной динамики логистической сети, реализующей процесс транспортировки грузов с учетом влияния случайных факторов, взаимосвязей переменных и обратных связей в системе транспортировки.

- Исследование методов и алгоритмов качественного и количественного анализа рисков логистических систем, разработка модели и алгоритма учета рисков при формировании оптимальных транспортных схем доставки грузов.

- Разработка адаптивной оптимальной стратегии транспортировки ресурсов с учетом возможных изменений проекта строительства.

Методы исследования. При решении поставленных задач были использованы принципы системного анализа и теории принятия решений; методы оценки и анализа рисков, методологии имитационного моделирования, в частности, системной динамики, а также теории вероятности и теории случайных процессов, теории оптимального управления, линейного, нелинейного, динамического и стохастического математического программирования.

Научная новизна работы заключается в разработке нового инструментария для принятия управленческих решений в области формирования оптимальных транспортных схем доставки ресурсов в труднодоступные регионы строительства, которая состоит в том, что:

1. На основе системного анализа факторов, определяющих планирование и процесс доставки грузов в труднодоступные районы строительства объектов нефтегазовой отрасли, сформулирована задача оптимизации формирования схем доставки грузов для сложных транспортных систем в условиях неопределенности

и риска, предложена структура соответствующей компьютерной системы поддержки принятия решений (КСППР) на основе использования методов и моделей оптимизации, имитационного моделирования, анализа рисков, теории Марковских случайных процессов, которая позволяет формировать оптимальные транспортные схемы доставки грузов на отдаленные и труднодоступные объекты строительства нефтегазовой отрасли с учетом факторов неопределенности и риска.

2. Предложено в рамках разработанной КСППР задачу планирования оптимальных транспортных схем в условиях неопределенности и риска решать с использованием оптимизационно-имитационного подхода (моделей и алгоритмов), которые позволяют учесть при принятии решения стохастические факторы, поведение системы в динамике с учетом случайных факторов и взаимозависимостей параметров задачи. При этом, для учета результатов имитационного моделирования в оптимизационной задаче предложено рассматривать поставленную задачу как задачу стохастического математического программирования в M -постановке, в качестве критерия оптимальности которой используется критерий минимума математического ожидания затрат при различных поведеньях внешней среды в процессе транспортировки и которая решена с помощью градиентных методов как задача нелинейного математического программирования.

3. Для обеспечения работы оптимизационно-имитационной модели на основе метода системной динамики разработана имитационная модель, реализующая процесс доставки грузов во времени по заданной транспортной сети с учетом стохастического характера переменных задачи, их взаимозависимостей, а также обратных связей в системе транспортировки.

4. Предложены модель и алгоритм комплексной многокритериальной оценки и контроля риска транспортировки грузов в составе оптимизационно-имитационного алгоритма формирования оптимальной схемы доставки грузов.

5. Предложена стохастическая модель выработки адаптивной оптимальной стратегии транспортировки ресурсов с учетом возможного изменения проекта

строительства, где стратегия определяется как набор правил выбора управлений в каждом состоянии Марковской цепи, характеризующей случайный процесс эволюции внешней среды.

Практическая ценность. Разработанные алгоритмы целесообразно использовать при планировании оптимальных схем доставки грузов на труднодоступные объекты строительства при проектировании подобных объектов, в том числе в составе систем автоматизированного проектирования, а также их корректировки в процессе строительства. За счет учета при решении задачи вероятностных факторов и анализа рисков повышается точность оценки затрат и потерь при транспортировке, что впоследствии при строительстве приводит к меньшим корректировкам фактических затрат по сравнению с данными проектной документации. Анализ схем доставки прошлых лет показал, что основными факторами изменения общих затрат являлись: задержки грузов в пути вследствие непредвиденной загрузки участков перевозки или природных факторов, которые не были учтены в первоначальных расчетах; изменения тарифов доставки; потери ресурсов в процессе транспортировки; изменения в проекте строительства, связанные с потребностью в МТР.

Кроме того, разработанные модели и алгоритмы могут быть применены в учебном процессе для изучения проблем решения оптимизационных задач с учетом неопределенностей с использованием имитационного моделирования, а также анализа рисков и поиска оптимальных решений в логистических системах.

Основные защищаемые положения:

1. Оптимизационно-имитационный подход (модели и алгоритмы), позволяющий учесть при принятии решения стохастические факторы, поведение транспортной системы в динамике с учетом случайных факторов и взаимозависимостей параметров задачи путем учета результатов имитационного моделирования системы транспортировки и решения оптимизационной задачи как задачи стохастического математического программирования в М-постановке, в качестве критерия оптимальности которой используется критерий минимума математического ожидания затрат при различных поведеньях внешней среды в

процессе транспортировки и которая решена с помощью градиентных методов как задача нелинейного математического программирования.

2. Имитационная модель, реализующая процесс доставки грузов во времени по заданной транспортной сети с учетом стохастического характера переменных задачи, их взаимозависимостей, а также обратных связей в системе транспортировки.

3. Модель и алгоритм комплексной многокритериальной оценки и контроля риска транспортировки грузов в составе оптимизационно-имитационного алгоритма формирования оптимальной схемы доставки грузов.

4. Марковская стохастическая модель выработки адаптивной оптимальной стратегии транспортировки ресурсов с учетом возможного изменения проекта строительства, где такая стратегия определяется как набор правил выбора управлений в каждом состоянии Марковской цепи, характеризующей случайный процесс эволюции внешней среды.

5. Структура и программная реализация компьютерной системы поддержки принятия решений (КСППР), которая позволяет формировать оптимальные транспортные схемы доставки грузов на отдаленные и труднодоступные объекты строительства нефтегазовой отрасли с учетом факторов неопределенности и риска.

Апробация работы. Основные теоретические результаты работы обсуждались на следующих конференциях:

1. Девятая всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, 2011.

2. Десятая всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, 2013.

3. Научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов среди научно-исследовательских и проектных предприятий ОАО «Газпром» по

теме «Актуальные вопросы проектирования объектов добычи и транспорта газа», ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, 2013.

4. Шестая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2013), Казань, 2013.

5. Пятая международная молодежно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» в ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, 2013.

Публикации. Основное содержание работы отражено в девяти печатных работах, из которых 4 работы – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 – в иных научных сборниках.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы 151 страницы, в том числе 31 рисунок и 8 таблиц. Список литературы включает 115 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследования, приведены задачи и методы исследований и дано краткое содержание работы.

В первой главе проведен анализ задачи формирования транспортных схем доставки грузов в отдаленные и труднодоступные регионы строительства объектов газовой отрасли, показавший актуальность проблемы. Анализ факторов, влияющих на процесс доставки грузов в нефтегазовой отрасли, показал значительное влияние на этот процесс случайных факторов и факторов риска. Существующие в настоящее время модели и методы совсем не учитывают или учитывают в недостаточной степени эти особенности задачи формирования оптимальных транспортных схем. Обоснована необходимость создания новых моделей, которая потребует развития существующего математического аппарата поддержки принятия решений. Предложен оптимизационно-имитационный

подход, модель и алгоритм решения задачи формирования транспортных схем доставки грузов. Описана постановка задачи в форме линейного программирования: проанализированы исходные данные, выделены критерии и ограничения. С учетом воздействия вероятностных факторов рассмотрена постановка задачи в форме задачи стохастического программирования в М-постановке, а также предложен алгоритм ее решения с использованием имитационной модели, в основе которого лежит градиентный алгоритм решения задач нелинейного программирования.

Во второй главе исследованы методы анализа рисков логистических систем, а также анализа риска изменения проекта строительства, и как следствие объемов транспортировки ресурсов. Разработаны модель и алгоритм анализа рисков участков транспортировки на основе анализа чувствительности целевой функции к возникновению рисков факторов на участках перевозки. Задача формирования транспортных схем доставки грузов приведена в многокритериальной постановке с учетом критериев минимума логистических рисков, рассмотрены методы решения многокритериальных задач.

Риск смены проектных решений применительно к задаче формирования транспортных схем предложено формализовать как нестационарную марковскую цепь эволюции внешней среды, получение оптимальной стратегии с учетом которой предложено получить на основе метода динамического программирования.

В третьей главе проанализированы существующие методологии имитационного моделирования и их применимость при решении задачи формирования оптимальных транспортных схем доставки грузов. Разработана имитационная модель логистической сети на базе принципа системной динамики, учитывающая воздействие случайных факторов в процессе транспортировки а также возникающие в логистической сети обратные связи.

В четвертой главе разработана структура системы поддержки принятия решений формирования оптимальных транспортных схем доставки грузов на труднодоступные объекты строительства, определены основные функции и

модули такой системы. Рассмотрен пример формирования оптимальных транспортных схем доставки грузов.

В заключении сформулированы основные результаты проведенного исследования, выполненного в соответствии с заявленными целями.

Работа выполнена в Российском государственном университете нефти и газа имени И.М. Губкина.

1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА ТРАНСПОРТНЫХ СХЕМ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

1.1. Методы и модели транспортной логистики

Задачам транспортной логистики посвящено большое количество литературы [4, 5, 31, 54, 67, 74,115]. Обзор математических моделей и методов приведен в [74]. Рассмотрены модели транспортной, складской логистики, методы определения оптимального размера заказов и запасов [11], и др.

Среди задач операций по своей содержательной постановке исследования можно выделить несколько классов, принципы которых могут быть использованы при планировании оптимальных транспортных схем доставки в труднодоступные регионы строительства. Можно выделить задачи выбора маршрутов, состоящие в определении наиболее экономичных маршрутов [115]; задачи оценки сроков отправки и доставки ресурсов «точно в срок» [10]; задачи сетевого планирования, которые рассматривают соотношения между сроками окончания крупного комплекса работ и моментами начала всех операций комплекса, и состоят в минимальной продолжительности комплекса операций, оптимального соотношения величин стоимости и сроков их выполнения; задачи управления запасами [109], состоящие в отыскании оптимальных значений уровня запасов и размеров заказа, особенность таких задач заключается в том, что с увеличением уровня запасов, с одной стороны, увеличиваются затраты на их хранение, но, с другой стороны, уменьшаются потери вследствие возможного дефицита запасаемого продукта; задачи распределения ресурсов, возникающие при определенном наборе работ, которые необходимо выполнить при ограниченных ресурсах, и требуется найти оптимальное распределение ресурсов между работами.

Теоретические основы исследования операций, моделей и методов принятия оптимальных решений изложены в [17,19,21,24,45,], в том числе при

оптимизации больших систем [70]. Способами решения многих классов оптимизационных задач являются методы линейного [19,30] и нелинейного [104] программирования. Методы решения задач линейного программирования (геометрический, симплексный методы) основаны на свойстве выпуклости множества допустимых решений задачи, оптимальное решение задачи располагается в одной из угловых точек выпуклого многогранника [53]. Важным частным случаем задач линейного программирования являются частично целочисленные задачи (могут быть решены в частности с помощью методов Гомори и ветвей и границ [53]), обусловленные тем, что компоненты решений значительной части экономических задач должны быть целочисленными.

Задачи транспортной оптимизации часто представляют в форме потоков в сетях, при этом структура транспортной сети представляется в виде ориентированного графа [9,13,41,55,71,78].

Для нелинейных задач возможность получения оптимального решения зависит от вида функции (важным является свойство выпуклости), такие задачи могут быть решены приближенно с использованием методов спуска, либо эвристических алгоритмов. Описание таких моделей приведено, например, в [53,87,73].

Важным методом решения динамических оптимизационных задач является динамическое программирование [6,19,29,65,104,105]. Модели динамического программирования широко применяются в задачах принятия решений: разработка правил управления запасами, календарного планирования, распределения капиталовложений, замены оборудования и др. [7, 72]. Общей особенностью всех моделей динамического программирования является сведение задачи принятия решений к получению рекуррентных соотношений, известных как уравнения Беллмана.

Для практической реализации таких моделей необходимо полностью детерминированное представление исходных данных. Задачи принятия решений в условиях неопределенности, при наличии вероятностных факторов рассматриваются в [84,86,93,97], предложены аппарат нечеткой логики [8], теория

стохастического программирования [43], имитационного моделирования, анализа рисков. В [105] рассмотрено применение метода динамического программирования для принятия решений в стохастических условиях, при этом параметры внешней среды представляются в виде марковской цепи [19,23,36,37,96].

При осуществлении выбора в условиях неопределенности, прежде всего, важно определить понятие оптимального решения. При решении стохастических задач [43,83] часто руководствуются критерием математического ожидания функции цели, то есть потерь или выигрыша “в среднем” [3,18,38,42,100] с учетом всего периода рассмотрения процесса.

Стохастическое моделирование предполагает, что руководитель располагает возможностью выбора распределения вероятностей, которое позволило бы описать характер неопределенности, содержащейся в модели. В процессе вычисления вероятностей необходимо по возможности более детально учитывать все параметры, влияющие на наступление случайных событий. В [9,65,98] предложен специальный метод (метод анализа иерархий) измерения (численной оценки) сложной совокупности экспертных суждений. МАИ позволяет правильно организовать получение этих суждений с целью достижения большего приближения к реальности, объективности и согласованности оценок.

Имитационное моделирование или метод статистических испытаний [14,16,40,50,90] применяется для исследования функционирования отдельных элементов или структуры системы в целом, взаимодействия системы с внешней средой, влияния на ее внутренние параметры возмущений во внешней среде. Цель имитационного моделирования состоит в воспроизведении поведения исследуемой системы на основе результатов анализа наиболее существенных взаимосвязей между её элементами или другими словами — разработке симулятора (англ. simulation modeling) исследуемой предметной области для проведения различных экспериментов. К имитационному моделированию прибегают, когда дорого или невозможно экспериментировать на реальном объекте [69]; невозможно построить аналитическую модель: в системе есть время,

причинные связи, последствие, нелинейности, стохастические (случайные) переменные; необходимо симитировать поведение системы во времени. Задачам моделирования сложных систем с обратными связями во времени и проведению имитационных экспериментов [75] посвящены [15,22,32,47,91].

В зависимости от свойств реальной модели и необходимого уровня абстракции обычно используют один из трех основных принципов моделирования: принцип системной динамики, предложенный Дж. Форрестером [34,102,103], дискретно-событийное моделирование и сравнительно новое направление - агентное моделирование [35, 52,108].

Методы имитационного моделирования служат средством анализа системы, ее поведения во времени с учетом случайных воздействий, результаты которого могут быть применены при решении оптимизационной задачи в линейной постановке. Задача построения алгоритма использования результатов имитационного моделирования при поиске экстремума функции цели, до сих пор остается актуальной [2, 106].

Методы анализа рисков используют для учета случайных факторов в оптимизационных задачах. Задачам оценки и анализа рисков сложных систем посвящены [1,28,112-114]. Однако большая часть представленного материала посвящена общему алгоритму управления рисками, а также их качественному анализу, различным подходам к классификации, построению причинно-следственных диаграмм и пр. Для количественного анализа рисков используют анализ чувствительности функции цели [1], использованный в данной работе. Кроме того, применение анализа рисков при проектировании отражено в государственных стандартах [26,27].

Часто при постановке оптимизационных задач сталкиваются с несколькими функциями цели, которые могут быть исчисляться разными единицами измерения. В таком случае чаще всего не существует единственного оптимального решения задачи (когда существуют противоречащие критерии), однако можно определить границы, в которых находятся множества приемлемых решений – так называемые Парето-оптимальные решения [81].

При возникновении в оптимизационных задачах нескольких критериев необходимо найти способ соизмерять эти критерии для получения решения. Оптимальные решения в таких задачах получают с учетом формализованного мнения о ситуации лиц, принимающих решение. Обычно при решении многокритериальных оптимизационных задач предлагается использовать различные виды свертки критериев с учетом их относительной важности, отражающей экспертное мнение. Основная трудность, возникающая при формировании и использовании обобщенных критериев, заключается в сложности определения весовых коэффициентов, на которые возложена функция адекватного отражения степени важности критерия, его физической размерности и иногда других факторов. К недостаткам обобщенных критериев следует также отнести и то, что при оценке они не позволяют учитывать часто встречающуюся иерархическую зависимость результирующего показателя от значений частных показателей.

Многокритериальная оценка вариантов решения может быть выполнена также на основе правил выбора по Парето. Здесь предпочтительным считается такой проект, для которого не существует другого проекта лучше данного хотя бы по одному показателю и не хуже него по всем остальным [81]. Кроме того, используются: процедура Борда, турнирная таблица, принцип гарантированного результата, метод последовательных уступок, метод анализа иерархий, и другие [98]. Методы решения задач со многими критериями описаны также в [33,39,51,66,68,81,110].

1.2. Задача формирования оптимальных транспортных схем доставки грузов в составе проекта строительства объекта

Согласно действующим нормативным актам [82] проектная документация (далее ПД) на объекты капитального строительства производственного назначения должна содержать Раздел «Проект организации строительства» (раздел 6 ПД для объектов капитального строительства производственного назначения и раздел 5 ПД для линейных объектов капитального строительства).

В этом разделе должны быть отражены в том числе: характеристика района расположения объекта строительства, условий строительства и оценка развитости транспортной инфраструктуры, а также *описание транспортной схемы (схем) доставки материально-технических ресурсов* с указанием мест расположения станций и пристаней разгрузки, промежуточных складов и временных подъездных дорог. Необходимость формирования оптимальных транспортных схем доставки МТР с учетом большого количества факторов (в том числе факторов неопределенности) обусловлена тема настоящей работы. Оптимальное планирование транспортных потоков МТР важно как с точки зрения надежности поставок (минимизации риска срыва сроков строительства) так и с точки зрения оптимизации самой стоимости доставки.

В современных условиях строительства объектов нефтегазовой отрасли в отдаленных регионах страны: ограниченность транспортных путей (пропускная способность, сезонность работы), длительность доставки и потребность в большом количестве МТР в течение всего периода строительства выбор рационального на первый взгляд решения (самого дешевого маршрута или маршрута с большей пропускной способностью) может привести к непредсказуемым последствиям из-за неопределенностей и случайных событий. Чтобы выбрать лучшее решение, необходимо рассмотреть возможные последствия того или иного решения, что при большой размерности задачи невозможно без средств математического моделирования и автоматизации расчетов.

Такой автоматизированный инструмент для долгосрочного планирования логистики может быть использован в составе средств автоматизированного проектирования при разработке раздела проектной документации «Проект организации строительства». Разработанный инструмент планирования логистики может также быть использован при контроле над выполнением сроков строительства, при этом могут быть внесены изменения в разработанные при проектировании транспортные схемы.

В результате такой инструмент должен позволять:

- выбирать оптимальные с точки зрения сроков, затрат и рисков способы транспортировки и маршруты движения грузов;
- получить оценку стоимости суммарных затрат на доставку ресурсов и риска срыва сроков доставки ресурсов на объект строительства (изначальную при проектировании и корректировки в процессе строительства).

Раздел «Проект организации строительства» должен содержать также следующую информацию:

Для нелинейных объектов капитального строительства производственного назначения:

1. обоснование принятой организационно-технологической схемы, определяющей последовательность возведения зданий и сооружений, инженерных и транспортных коммуникаций, обеспечивающей соблюдение установленных в календарном плане строительства сроков завершения строительства (его этапов);

2. технологическую последовательность работ при возведении объектов капитального строительства или их отдельных элементов;

3. обоснование принятой продолжительности строительства объекта капитального строительства и его отдельных этапов и календарный план строительства, включая подготовительный период (сроки и последовательность строительства основных и вспомогательных зданий и сооружений, выделение этапов строительства);

4. обоснование потребности строительства в кадрах, основных строительных машинах, механизмах, транспортных средствах, в топливе и горюче-смазочных материалах, а также в электрической энергии, паре, воде, временных зданиях и сооружениях;

5. обоснование размеров и оснащения площадок для складирования материалов, конструкций, оборудования

Для линейных объектов капитального строительства производственного назначения:

1. сведения о местах размещения баз материально-технического обеспечения, производственных организаций и объектов энергетического обеспечения, обслуживающих строительство на отдельных участках трассы, а также о местах проживания персонала, участвующего в строительстве, и размещения пунктов социально-бытового обслуживания (при необходимости);

2. обоснование потребности в основных строительных машинах, механизмах, транспортных средствах, электрической энергии, паре, воде, кислороде, ацетилене, сжатом воздухе, взрывчатых веществах (при необходимости), а также во временных зданиях и сооружениях;

3. обоснование организационно-технологической схемы, определяющей оптимальную последовательность сооружения линейного объекта;

4. обоснование принятой продолжительности строительства;

5. организационно-технологические схемы, отражающие оптимальную последовательность возведения линейного объекта с указанием технологической последовательности работ.

Эти проектные данные в свою очередь являются исходными данными для задачи формирования оптимальных транспортных схем (укрупнено это: календарный план и нормативные сроки строительства объектов, потребность в материально-технических ресурсах с привязкой к календарному плану, размеры площадок складирования МТР).

1.2.1. Характеристика и особенности факторов, влияющих на процесс доставки грузов в нефтегазовой отрасли

Проекты строительства объектов газового хозяйства отличаются длительностью и растянутостью во времени. Единовременная поставка полного объема ресурсов на приобъектный склад, во-первых, нецелесообразна, а во-вторых, практически нереализуема в связи с ограниченностью пропускной способности маршрутов доставки, производственных мощностей заводов-изготовителей и складов готовой продукции. Для таких проектов необходимы

многономенклатурные поставки из различных точек страны, это означает сбор исходных данных и анализ огромного количества информации.

Решение задачи снижения совокупных затрат на доставку груза предполагает расчет и анализ себестоимости перевозок на каждом виде транспорта. Такой расчет, а также оценка длительности перевозки по возможным вариантам доставки для каждого типа ресурсов является отдельной трудоемкой задачей, особенно учитывая рыночные условия в сфере грузоперевозок и закрытость информации. Выяснить характеристики транспортной системы региона часто невозможно без выезда на объекты, официального общения с компаниями – перевозчиками, экспедиторами и владельцами инфраструктуры.

Исходную информацию можно получить лишь на основе имеющихся данных о количестве и номенклатуре требуемых ресурсов. Поскольку на ранних стадиях проектирования такие перечни ресурсов (составленные часто по объектам-аналогам) являются приближенными, исходные данные по тарифам и длительности перевозки имеют погрешности или являются усредненными. Кроме того, стоимость и условия доставки могут варьироваться в зависимости от компании, оказывающей услуги.

Схема процесса доставки представлена на рисунке 1.1.

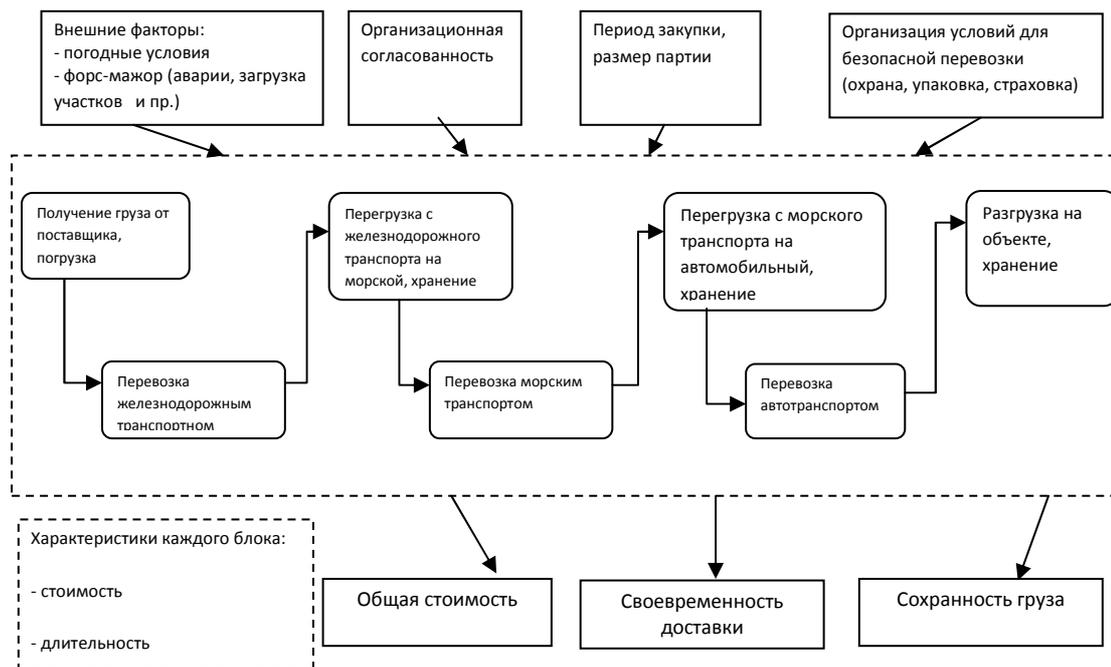


Рисунок 1.1- Процесс транспортировки и влияющие на него факторы.

Особенностью труднодоступных регионов является необходимость комбинирования практически во всех случаях различных видов транспорта, что сопровождается многочисленными сопутствующими операциями (погрузочно-разгрузочные работы, подготовка, очистка транспортных средств, хранение и пр.).

Выбор маршрутов после сбора информации о транспортной инфраструктуре и возможных участках перевозки следует производить по следующим критериям:

- экономическая эффективность;
- согласованность с графиком строительства объектов;
- увязка по характеристикам участков транспортной схемы (пропускная способность, периоды работы и пр.);
- организационная согласованность;
- анализ рисков.

Рассмотрим подробнее каждый из критериев:

1. Экономическая эффективность подразумевает

- оценку стоимости доставки по участку (диапазон);
- необходимость сопутствующих затрат (определяется наличием необходимой инфраструктуры на участке для перевозки).

2. Организационная согласованность включает в себя:

- согласованность с поставщиками;
- согласованность с подрядчиками;
- согласованность с прочими компаниями (страхование, прочие документы);
- согласованность с перевозчиками;
- увязка с источниками финансирования.

3. Согласованность поставок с графиком строительства объектов определяется с учетом следующих данных:

- оценка объема строительства и необходимых МТР;
- сроки (начало, конец) и продолжительности строительных работ;

Процесс строительства, определяющий потребность в ресурсах может быть формализован и отображен в форме сетевого графика. В сетевом графике учитываются все работы по проекту с учетом срока, последовательности их выполнения и зависимости производства одних работ от завершения других; определяются критические работы, от выполнения которых зависит срок окончания строительства. Оптимизация сетевого графика позволяет распределить материальные и трудовые ресурсы с целью сокращения продолжительности строительства или минимизации рисков срыва нормативных сроков (перераспределяя ресурсы с работ с резервом времени на работы критического пути).

Сетевой график определяет также приоритетность доставки отдельных видов ресурсов. Так, в случае если работа лежит на критическом пути, недостаток ресурсов для ее выполнения означает срыв сроков строительства всего объекта. При наличии резервов времени на выполнение работы, необходимые ресурсы можно доставить в рамках времени резерва. Одни ресурсы применяются в разных работах и доставляются в больших количествах, другие же могут быть единичными (оборудование, машины) либо специфическими для определенных видов работ. Ресурсы, применяемые во многих работах можно перераспределять с не критических работ на более срочные. Предполагается, что при наличии определенных для работ наборов МТР, в первую очередь ресурсы распределяют на работы с минимальным резервом времени. Оптимизация сетевого графика, с использованием ресурсов в наличии (за счет перераспределения ресурсов между работами или изменения топологии сети) представляет собой отдельную задачу, которая не рассматривается в рамках данной работы.

При построении сетевого графика проекта строительства событиям, определяющим начало каждой из работ (которые, в свою очередь, определяют потребность в ресурсах в определенный момент времени) будут соответствовать следующие величины: ранний срок свершения $t_p(i)$, поздний срок свершения $t_n(i)$, и резерв времени события $R(i)$ [53]. Ранний срок события определяется продолжительностью максимального пути, предшествующего событию. Резерв

времени события показывает на какой допустимый период времени можно задержать наступление этого события, не вызывая при этом увеличения срока выполнения всего комплекса работ. События, лежащие на критическом пути, не имеют резервов времени, так как любая задержка критического события вызывает такую же задержку всего комплекса работ.

Работы, для которых данное событие является предшествующим, определяют необходимость доставки МТР различных типов к моменту его свершения. Тогда из перечня работ сетевого графика и описанных характеристик событий можно сформировать количество ресурсов определенного типа, требуемых в точке строительства по ранним срокам событий, и количество ресурсов, требуемых в точке строительства по поздним срокам событий.

В целях исследования обозначим точное время окончания строительства, определяемое длиной критического пути сетевого графика, определим потребности в ресурсах с точной привязкой ко времени (для ресурсов, требуемых на работах критического пути), или с учетом временных диапазонов (для ресурсов, требуемых на работах с резервом времени).

4. Увязка по характеристикам участков транспортных схем

- Периоды работы участков транспортных схем: автозимников; морских путей; речных путей; автодорог без асфальтированного покрытия;
- Пропускная способность участков транспортных схем: автозимников, морских путей в разные периоды времени, автомобильных дорог, речных путей в разные периоды времени, железнодорожных станций, портов, баз хранения;
- Наличие альтернативных путей для каждого участка;
- Сроки (временной диапазон) доставки грузов по каждому участку;
- Возможное изменение характеристик (пропускной способности, стоимости перевозки), путем усовершенствования участка (сопутствующие затраты).

5. Анализ рисков предполагает рассмотрение:

- рисков на участках перевозки;
- рисков изменения проектных решений;

При выборе оптимального плана поставки грузов по маршрутам следует учитывать:

- Необходимость комбинирования различных способов перевозки (автомобильный, железнодорожный, морской, авиационный);
- Различия в стоимости доставки по различным участкам различными видами транспорта и по типам грузов;
- Различия в длительности доставки по различным участкам различными видами транспорта и по типам грузов;
- Различия в воздействии на окружающую среду различных видов транспорта;
- Возможность расширения транспортной инфраструктуры с учетом дополнительных вложений;
- Ограниченная пропускная способность участков перевозки;
- Сезонные ограничения по видам транспорта;
- Необходимость учета возможности хранения грузов в точках перевалки;
- Согласованность сроков доставки ресурсов с календарным планом строительства;
- Приоритетность доставки отдельных видов ресурсов;
- Характеристики поставщиков;
- Увеличение отпускных цен ресурсов и стоимости доставки с течением времени (инфляция);
- Особенности перевозки видов определенных грузов и особенности транспорта, такие как:
 - Грузовместимость морских и речных судов может достигать нескольких тысяч тонн, при этом нецелесообразно загружать целое судно несколькими тоннами груза, следует обеспечить нормативную его загрузку для эффективности перевозки. Поэтому при учете морских и речных участков перевозки в задаче следует вводить ограничения на минимум отправки груза водным транспортом. При отправке грузов железнодорожным и автомобильным транспортом таким

ограничением можно пренебречь, т.к. вместимость транспортных средств не так высока (70 т. для ж.-д. транспорта и десятки тонн для автомобильного). При этом для судов устанавливается ограничение как по массе, так и по объему вместимости.

- Различия в условиях доставки отдельных видов ресурсов [76]. Некоторые грузы требуют для перевозки специализированных видов транспорта (специализированных вагонов, например цистерн, рефрижераторов и пр., специальных приспособлений на судне). В этом случае наличием специализированных транспортных средств (ТС) определяется своя пропускная способность участка перевозки. Кроме того, некоторые ресурсы просто не могут быть перевезены определенным видом транспорта. В некоторых случаях требуется обязательная охрана, что в свою очередь отражается на тарифе доставки.

- Некоторые грузы, например, комплектно поставляемое оборудование, часто занимает несколько ТС, при этом их стоит перевозить и хранить комплектно.

- Возможность закупки требуемых объемов ресурсов у различных поставщиков. Один и тот же вид ресурсов можно закупать у различных производителей по различным отпускным ценам. Соответственно расстояние доставки также будет разным. Таким образом, при выборе поставщика необходимо в оптимизационной задаче учитывать следующие факторы:

- отпускная цена ресурса;
- расстояние и соответственно стоимость доставки от завода-изготовителя.

Эти параметры описываются при рассмотрении графа – схемы транспортировки.

- возможность поставки требуемого объема ресурсов в определенный срок;
- надежность поставщика (организационная согласованность; финансовая надежность).

При строительстве объектов ОАО «Газпром» поставщики важнейших МТР обычно либо определены соответствующими приказами и протоколами согласования цен и поставщиков, либо должны быть включены в согласованные

реестры поставщиков по видам продукции. Таким образом, можно считать, что выбор происходит среди заведомо надежных поставщиков, и соответствующие экспертные оценки в модели можно не учитывать.

1.3. Постановка задачи оптимизации формирования оптимальных транспортных схем

Общую схему возможных маршрутов доставки можно представить в виде ориентированного графа, вершины которого отражают точки перевалки, ребра – возможные участки перевозки между этими точками, начальные вершины графа отражают заводы изготовители или поставщиков ресурсов, конечные – объекты строительства, например:

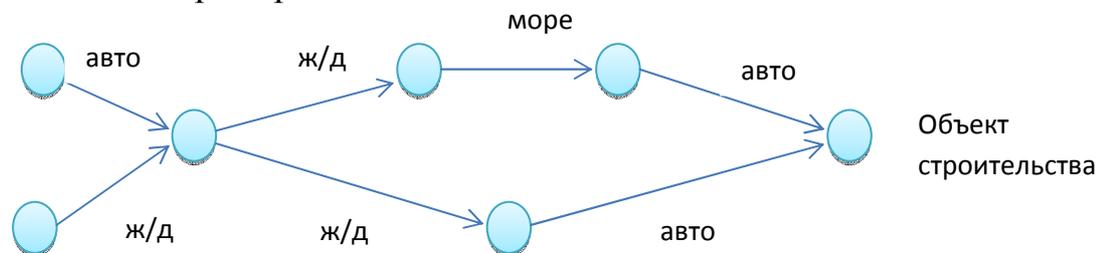


Рис 1.2. Вариант отображения схемы транспортировки в виде ориентированного графа.

Задачу распределения грузопотоков по участкам перевозки и периодам доставки можно рассматривать как задачу линейного программирования [59,63].

Стоимость транспортировки по участкам включает в себя большое количество отдельно оплачиваемых операций, таких как непосредственно перевозка, погрузочно-разгрузочные работы, подача-уборка вагонов для железнодорожного транспорта, буксировка для некоторых судов и пр. Стоимость всех операций следует учитывать в задаче. Предполагается, что тарифы изменяются в зависимости от периода времени, что позволяет учитывать инфляцию в постановке задачи.

Предполагается, что в качестве исходных данных имеются усредненные тарифы на транспортные операции (перевозку, погрузку, разгрузку и пр.) единицы груза (например, 1т.) Получить тарифы такого формата часто бывает проблематично, поскольку стоимость отправки рассчитывается на единицу

подвижного состава (судно, вагон, автомобиль и др.) Такие тарифы в итоге носят усредненный характер, поскольку рассчитываются для средней загрузки транспортного средства. Однако, так или иначе, тарифы дифференцируются по типам грузов в зависимости от их массогабаритных характеристик (перевозка объемных и легковесных грузов обычно дороже за единицу веса, что объясняется меньшей загрузкой транспортного средства) и особенностей доставки (например, грузы, требующие обязательной охраны, опасные грузы).

Задача линейного программирования с учетом описанных выше факторов выглядит следующим образом:

Обозначим

i – номер участка перевозки, $i = 1 \dots I$ (каждому участку соответствует определенный вид перевозки, основные виды транспорта: железнодорожный, автомобильный, морской, речной, авиа);

j – тип ресурсов, $j = 1 \dots J$;

l – номер пункта перевалки, $l = 1 \dots L$;

k – номер возможного поставщика ресурсов, $k = 1 \dots K$;

t – номер условного периода времени в задаче, $t = 1 \dots T$;

Δt – продолжительность условного периода времени для задачи (например, 1 мес.);

τ_{it} – длительность перевозки груза по участку i в период времени t ;

C_{ijt} – стоимость перевозки по участку i ресурса типа j в период t ;

Ch_{ljt} – стоимость хранения ресурсов типа j в точке l в период t ;

Cpr_{ijt} – стоимость приема грузов типа j , доставленных участку i путем v в период t (разгрузочные работы и сопутствующие операции);

Cot_{ijt} – стоимость отправки грузов типа j , по участку i в период t (погрузочные работы и сопутствующие операции);

Ch^*_{jt} – затраты по хранению избытка ресурсов j -го типа в конечной точке в период t ;

Cap_{it} – пропускная способность перевозки по участку i в период t ;

Cap_{hlt} – максимальный объем хранения грузов в точке l в период t ;

Pr_{jt} - количество ресурсов j -го типа требуемых в точке строительства, определенное по ранним срокам событий сетевого графика;

Pp_{jt} - количество ресурсов j -го типа требуемых в точке строительства, определенное по поздним срокам событий сетевого графика;

Z^*_{jt} - избыток ресурсов j -го типа в конечном пункте в t -й период;

S_{jkt} - стоимость закупки единицы ресурса типа j у поставщика k в период t ;

N_{jkt} - производительность предприятия-изготовителя, возможность изготовления и поставки для нужд заказчика ресурсов типа j поставщиком k в единицу времени Δt в период t ;

V_j - усредненный объем единицы j -го типа ресурсов;

M_j - усредненная масса единицы j -го типа ресурсов;

Искомыми переменными являются:

X_{ijt}, Y_{ijt} - объемы отправленных и принятых ресурсов j -го типа, отправленных по участку i в период t ;

Z_{ljt} - объем ресурсов j -го типа, хранящихся в точке l в период t .

В качестве целевой функции принимается минимум общих затрат, включающих в себя стоимость перевозки, стоимость хранения грузов пунктах перевалки, стоимость приемки и отправки грузов в пунктах перевалки (погрузочно-разгрузочные работы и пр.). Следовательно, необходимо минимизировать функцию:

$$F = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} (X_{ijt}(C_{ijt} + C_{otijt}) + Y_{ijt}C_{prijt}) + \sum_{l \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} Ch_{ljt} Z_{ljt} + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} Ch^*_{jt} Z^{**}_{jt} \rightarrow \min \quad (1.1)$$

При условии выполнения ряда ограничений.

Поясним последнее слагаемое целевой функции: согласно сетевому графику работы, для которых данное событие является предшествующим, определяют необходимость доставки МТР различных типов к моменту его свершения. Из перечня работ сетевого графика и описанных характеристик событий можно сформировать количество ресурсов j -го типа Pr_{jt} - требуемых в точке

строительства по ранним срокам событий, и Pp_{jt} - требуемых в точке строительства по поздним срокам событий.

Обеспечив поставку нужного количества ресурсов, исходя из поздних сроков начала работ, можно как минимум обеспечить выполнение всего комплекса работ в рамках общих сроков (длительности критического пути). Однако при заблаговременной поставке уменьшаются общие риски срыва сроков по независящим от поставок ресурсов причинам, поэтому *желательно* принимать во внимание и ранние сроки начала работ. Поэтому строгие сроки поставки ресурсов в задаче определим исходя из поздних сроков начала работ (ограничения), но не будем учитывать стоимость хранения ресурсов в промежутке между ранним и поздним сроками начала работ (формально поощряя заблаговременную доставку).

Тогда для $\forall j \in J, t \in T$

$$Z^{**}_{jt} = \begin{cases} 0, Z^*_{jt} - (Pr_{jt} - Pp_{jt}) < 0 \\ Z^*_{jt} - (Pr_{jt} - Pp_{jt}), Z^*_{jt} - (Pr_{jt} - Pp_{jt}) \geq 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

Тогда, исходя из необходимости выполнения в срок всего комплекса работ, введем ресурсные ограничения в конечной точке:

$$\forall j \in J, t^* \in T \quad \sum_{t=1}^{t^*} \sum_{i \in I_k} Y_{ijt} \geq \sum_{t=1}^{t^*} Pp_{jt}, \quad (1.3)$$

где I_k - участки перевозки, входящие в конечную точку.

Ресурсное ограничение (1.3) определяет, что общий объем закупок, и следовательно, отправляемых ресурсов определяется общей потребностью в ресурсах.

Для определения основного структурного ограничения для точек перевалки, начальных и конечных точек в зависимости от топологии транспортной сети, обозначим множество участков перевозки входящих в пункт l - Iin_l , множество

участков перевозки выходящих из пункта l - I_{out_l} . Тогда для каждой промежуточной точки должно выполняться соотношение:

$$Z_{ljt} = Z_{ljt-1} + \sum_{i \in I_{in_l}} Y_{ijt} - \sum_{i \in I_{out_l}} X_{ijt} \quad \forall l \in L, t \in T, j \in J, t \in T \quad (1.4)$$

Ограничение (1.4) отражает структурные ограничения: количество поступившего груза в период t определяет количество отправленного в следующий момент времени груза и оставленного на хранение. Для последней точки – приобъектного склада ограничение будет выглядеть следующим образом (1.5):

$$\forall j \in J, t \in T \quad Z^*_{jt} = Z^*_{jt-1} + \sum_{i \in I_k} Y_{ijt} - Pp_{jt}, \quad (1.5)$$

где I_k - конечные участки маршрутов, входящие в конечную точку.

Выражения (1.6), (1.7) отражают в общем виде ограничения пропускной способности участков перевозки, переработки и хранения грузов.

$$\forall l \in L, t \in T \quad \sum_{j \in J} Z_{ljt} \leq Cap_{lt}, \quad (1.6)$$

$$\forall i \in I, t \in T \quad \sum_{j \in J} X_{ijt} \leq Cap_{it}. \quad (1.7)$$

Потребность в специализированном транспорте для определенного груза формально определяет уменьшенную пропускную способность по участку перевозки. Например: пропускная способность железнодорожного участка перевозки определяется несколькими составляющими: скоростью перевозки и количеством путей, обрабатываемыми способностями станций и наличием подвижного состава. В данной ситуации именно наличие специализированного вагонного парка (а также инфраструктуры для работы с таким парком на станции) будет ограничителем пропускной способности для грузов со специальными условиями доставки. Аналогично можно рассматривать водные и автомобильные перевозки. Может случиться, что грузы, доступные для перевозки ж/д транспортом невозможно отправить морем и т.п.

Тогда введем дополнительные переменные Cap'_{ijt} – пропускные способности перевозки груза типа j по i –му участку в период t . При этом пропускные способности для отдельных грузов всегда меньше общей пропускной способности участка:

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad Cap'_{ijt} \leq Cap_{it} . \quad (1.8)$$

Тогда ограничение пропускной способности по отдельным типам грузов будет выглядеть следующим образом:

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad X_{ijt} \leq Cap'_{ijt} . \quad (1.9)$$

Ограничение, отражающее производительность заводов изготовителей может быть записано в разных формах в зависимости от договора поставки. Например, когда производитель определяет ежемесячный максимум поставки, условие выглядит следующим образом:

$$\forall j \in J, \forall t \in T, \forall k \in K \quad Zak_{jkt} \leq N_{jkt} , \quad (1.10)$$

где Zak_{jkt} – количество купленных ресурсов типа j у поставщика k в период времени t ; при этом, в зависимости от топологии (нескольким поставщикам может соответствовать один участок перевозки и наоборот) должно выполняться соотношение:

$$\forall j \in J, \forall t \in T \quad \sum_k Zak_{jkt} = \sum_{i \in I_n} X_{ijt} , \quad (1.11)$$

где I_n – множество начальных участков перевозки от k – го поставщика.

Количество закупленных ресурсов определяет отправку по участкам перевозки. Возможен вариант, когда для производителя определена ежемесячная производительность, при этом неотгруженная продукция может в течение некоторого периода храниться на складе производителя. Тогда обозначим как Q_{jk} – максимальный объем хранилища, произведенных МТР j -го типа k -го поставщика, тогда

$$\forall j \in J, \forall k \in K, \forall t^* \in T \quad 0 \leq \sum_{t=1}^{t^*} N_{jkt} - \sum_{t=1}^{t^*} Zak_{jkt} \leq Q_{jk} , \quad (1.12)$$

где t^* - любой период времени в рассматриваемом диапазоне.

Ограничение слева отражает закупку ресурсов в пределах производительности предприятия-изготовителя за определенный период времени, ограничение справа при этом отражает вместимость склада хранения ресурсов у производителя.

При этом для достижения минимума стоимости закупки ресурсов при выборе поставщиков введем дополнительный критерий:

$$\sum_t \sum_j \sum_k St_{jkt} * Zak_{jkt} \rightarrow \min . \quad (1.13)$$

По некоторым видам транспорта существует минимум отправки ресурсов, так как, например, невыгодно отправлять полупустое судно. Особенно это характерно для морского транспорта, для участков с небольшими транспортными средствами (авто, железная дорога) такими ограничениями можно пренебречь. Ограничение на минимум загрузки морского или речного судна можно вводить по массе МТР или по объему, в зависимости от типа ресурсов. В таком случае нужно задать переменные, характеризующие массогабаритные характеристики ресурсов: M_j – масса ресурсов j -го типа, V_j - объем ресурсов j -го типа. При этом критерий вида

$$\forall i \in I, \forall t \in T \quad \min(M_{it}^* - \sum_j M_j X_{ijt}; V_{it}^* - \sum_j V_j X_{ijt}) \leq 0, \quad (1.14)$$

где M_{it}^* – минимальная масса загрузки судна по участку i в период t ; V_{it}^* – минимальный объем загрузки судна по участку i в период t , использующий оба параметра, отражает одновременно ограничение по массе или по объему, однако не является линейным.

В таком случае, учитывая, что как масса загруженного судна, так и его объем определяет одинаковую стоимость перевозки такого судна. Тогда

$$\forall i \in I, \forall t \in T \quad \sum_j X_{ijt} C_{ijt} \geq R_{it}, \quad (1.15)$$

где R_{it} – минимальная стоимость отправки судна по участку i в период t . Индекс времени t в данном случае дает возможность изменять эту стоимость в зависимости от инфляции.

В более строгой постановке нужно не просто определять минимум отправки по морю, а задавать отгрузку кратной загрузке судна:

$$\forall i \in I, \forall t \in T \quad \sum_j X_{ijt} = bR_{it}, \quad (1.16)$$

где b – целое число. Однако так как стоимость отправки судна задана усредненно, это ограничение не значительно улучшает решение, при этом сводит задачу к частично-целочисленной.

Ограничение на неделимость некоторых типов грузов j выглядит следующим образом: $\forall j \in J, \forall i \in I, \forall t \in T \quad X_{ijt} = aM_j$, (1.17)

где a – некоторое целое число, M_j – масса комплекта ресурса j -го типа.

Это ограничение носит целочисленный характер и сводит задачу к частично целочисленной. Вводить его стоит в зависимости от конкретных исходных данных задачи.

$$\forall j \in J, \forall i \in I, \forall t \in T \quad X_{ijt}, Y_{ijt} \geq 0, \quad (1.18)$$

$$\forall j \in J, \forall l \in L, \forall t \in T, \forall k \in K \quad Z_{ljt}, Z_{jt}^*, Z_{jt}^{**}, Z_{akt} \geq 0. \quad (1.19)$$

Ограничения (1.18), (1.19) - искомые переменные неотрицательны.

Если пренебречь для линейной модели временем доставки ресурсов, то $X_{ijt} = Y_{ijt}$, в противном случае количество отправленного груза в единицу времени будет определяться выражением:

$$X'_{ijt} = X_{ijt} / \Delta t \quad (1.20)$$

Тогда количество принятого груза можно вычислить из выражения:

$$\forall j \in J, \forall i \in I, \forall t \in T \quad Y_{ijt} = \tau_{it-1} * (X_{ijt-1} / \Delta t) + (\Delta t - \tau_{it}) * (X_{ijt} / \Delta t) \quad (1.21)$$

Возможность расширения транспортной инфраструктуры (строительство зимней автодороги, железной дороги и пр.) с учетом дополнительных вложений может быть отражена в функции цели в следующем виде (затраты включаются в общий критерий минимизации затрат):

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} (X_{ijt}(C_{ijt} + C_{otijt}) + Y_{ijt}C_{prijt}) + \sum_{l \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} Ch_{ljt} Z_{ljt} + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} Ch_{jt}^* Z_{jt}^{**} + G_i \rightarrow \min, (1.22)$$

где G_i – единовременные вложения в расширения инфраструктуры i -го участка.

При этом при анализе необходимости крупных вложений задача может быть решена в обоих вариантах: с учетом дополнительных вложений (1.22) и без них (1.1), сравнение решений обоих вариантов показывает потребность в расширении инфраструктуры.

Иногда возникает вопрос об учете фактора воздействия транспорта на окружающую среду при принятии решений по распределению грузопотоков.

Согласно действующему законодательству [80] платежи за негативное воздействие на окружающую среду, в том числе за предельно допустимые выбросы (сбросы) загрязняющих веществ и размещение отходов производства и потребления, включаются в стоимость услуг по перевозке. Таким образом, можно считать, что экологические сборы учтены в функциях цели (1.1) и (1.22).

Однако внесение платы за загрязнение окружающей среды не освобождает от рационального использования природных ресурсов, поэтому в некоторых случаях, при прочих равных факторах выбор участка перевозки может быть произведен с учетом минимального воздействия на окружающую среду. Влияние воздействия на окружающую среду различных видов транспорта представлено в [79]. Тогда, в постановку оптимизационной задачи можно включить экспертную оценку экологического вреда участков перевозки в соответствии с уровнем воздействия на окружающую среду, а также соответствующий критерий минимума вреда окружающей среде при перевозках:

$$\sum_i \sum_j \sum_t E_i * X_{ijt} \rightarrow \min, (1.23)$$

где E_i – экспертная оценка экологичности участка перевозки;

В такой постановке задача решается, например, симплекс-методом и дает пригодное на начальных стадиях проектирования решение. Однако такое решение не учитывает возможные изменения переменных задачи. Эти переменные могут быть как независимыми, так и зависеть от поведения системы в

предыдущие периоды (изменение пропускной способности вследствие дополнительной отправки грузов, возможные затраты и изменение загрузки, связанные с потерями и дополнительной отправкой грузов и т.п.) или являться нелинейными функциями других переменных системы (длительность перевозки в зависимости от пропускной способности). В таком случае включение дополнительных зависимостей в задачу линейного программирования усложняет модель, она становится нелинейной, и требует более сложных методов решения.

Для получения оптимального решения в реальных условиях (как правило, носящих случайный характер) в задаче необходимо учесть:

- возможные задержки груза на участке перевозки (связанные или несвязанные с дополнительными затратами, неучтенные нормами времени операции, поломки транспортных средств, организационная несогласованность, задержки по вине грузоперевозчика и пр.).

- возможные дополнительные затраты на участках перевозки (неучтенные нормами, связанные с временными задержками, связанные с потерями и дополнительной отправкой грузов).

- возможное изменение пропускной способности (загрузка другими грузоотправителями, форс-мажор, загрузка вследствие дополнительной отправки грузов).

- потери груза при перевозке (аварии, порча).

- потери груза при хранении (порча при хранении, списание испорченного при перевозке груза).

Изначально нечетко заданные исходные данные, возможное привлечение большего числа организаций-посредников, чем предполагалось в первоначальных расчетах, проведение внеплановых работ с отвлечением большого числа материальных ресурсов, непредсказуемость погодных условий, возможные изменения тарифов, форс-мажорные обстоятельства определяют вероятностный характер модели выбора доставки.

1.3.1. Применение методов стохастического программирования для учета факторов неопределенности

Для решения задач в условиях неопределенности есть два основных пути:

1. Осуществление выбора без получения какой-либо дополнительной информации;
2. Выполнение выбора в процессе функционирования системы на основе явного или неявного извлечения информации из наблюдений, что приводит к частичному или полному устранению неопределенности.

Второй путь есть путь адаптации. Под адаптивностью понимается свойство системы изменять свое поведение с целью сохранения, улучшения или приобретения новых характеристик в условиях меняющейся во времени среды, априорная информация о которой является неполной. Механизм адаптации [89,99] состоит в изменении параметров, стратегии управления или структуры системы на основе информации, поступающей или накапливаемой в процессе ее функционирования.

Можно указать ряд характеристик, проявление которых позволяет говорить о системе как об адаптивной [85]:

- устранение или уменьшение степени неопределенности в процессе функционирования системы (определение неизвестных характеристик системы или (и) среды);
- допустимость успешного функционирования системы при наличии небольшого объема априорной информации;
- нечувствительность (слабая чувствительность) к изменению внешних условий;
- асимптотическое приближение к тем или иным показателям по мере накопления информации;
- возможность достигнуть за конечное время функционирования системы приближения к оптимальному неопределимому по априорной информации значению показателя качества.

Первое, второе и третье являются необходимыми признаками адаптивной системы, четвертое и пятое, хотя и не являются обязательными, но отражают важные подходы к построению адаптивных систем, в частности, связанные с совмещением свойств адаптивности и оптимальности [85,86,100,101]. Понятие *адаптации* подразумевает принятие решений в процессе функционирования системы на основе явного или неявного извлечения информации из наблюдений, что приводит к частичному или полному устранению неопределенности.

Теория итеративных процессов нахождения экстремумов функции в стохастических условиях получила название теории *стохастической аппроксимации*, а задачи принятия решения - задач стохастического программирования [43]. Задачи стохастического программирования возникают тогда, когда каждое действие приводит к неоднозначному исходу и с каждым решением x можно связать числовые параметры $f(x, \omega)$, $\omega = 0...t$, зависящие от решения x и «состояния природы» ω . В стохастическом программировании предполагается, что ω является элементарным событием некоторого вероятностного пространства ($\omega \in \Omega$). Это пространство может зависеть от x и называется пространством состояний (природы) или пространством (случайных) параметров.

Основным отличием задач оптимального адаптивного выбора от задач стохастического программирования является то, что в первой практически отсутствует априорное вероятностное описание состояний природы, а во второй – априорные вероятностные сведения имеются. Однако для решения этих задач могут использоваться одни и те же стохастические итеративные алгоритмы. Разница при этом состоит лишь в том, что в первом случае неизвестные случайные воздействия генерируются средой, в которую погружена реальная система, а во втором – воздействия на стохастическую модель выбора генерирует ЭВМ в соответствии с введенными исследователем известными вероятностными характеристиками [100]. При доказательстве сходимости итеративных процессов для обеих указанных задач используются одни и те же принципы, базирующиеся на положениях теории стохастической аппроксимации.

Существуют следующие основные вероятностные принципы оптимизации. Осуществляется замена функций $f(x, \omega)$, что позволяет снять неопределенность и сформулировать соответствующие критерии вероятностной оптимизации. При этом вводятся следующие характеристики случайной функции [100]:

- математическое ожидание

$$f_M^*(x) = Mf(x, \omega) \quad (1.24)$$

- дисперсия

$$f_V^*(x) = M(f(x, \omega) - Mf(x, \omega))^2 \quad (1.25)$$

- вероятность превышения или, наоборот, не превышения значений случайной функции некоторого заданного порогового значения

$$f_P^*(x) = P\{f(x, \omega) > \beta\}, \text{ или } f_P^*(x) = P\{f(x, \omega) \leq \beta\} \quad (1.26)$$

- пороговые значения $\beta(x)$, нахождение выше или ниже которых, для значений случайной функции $f(x, \omega)$ гарантируется с заданной вероятностью p

$$f_B^*(x) = \beta(x) = \max\{\tilde{\beta} \mid P\{f(x, \omega) > \tilde{\beta}\} \geq p\} \quad (1.27)$$

или

$$f_B^*(x) = \beta(x) = \min\{\tilde{\beta} \mid P\{f(x, \omega) \leq \tilde{\beta}\} \geq p\} \quad (1.28)$$

Тогда соответствующие этим преобразованиям критерии оптимальности будут следующие:

1. Максимизация математического ожидания целевой функции:

$$\max f_M^*(x) = \max Mf(x, \omega) \quad (1.29)$$

2. Минимизация дисперсии целевой функции:

$$\min f_V^*(x) = \min M(f(x, \omega) - Mf(x, \omega))^2 \quad (1.30)$$

3. Максимизация вероятности превышения функцией цели заданного порога β :

$$\max f_P^*(x) = P\{f(x, \omega) > \beta\}, \quad (1.31)$$

4. Максимизация порогового значения, превышение которого функцией цели гарантируется с заданной вероятностью p :

$$\max f_B^*(x) = \max \beta(x) = \max\{\beta \mid P\{f(x, \omega) > \beta\} \geq p\} \quad (1.32)$$

В случае, если функция $f(x, \omega)$ описывает не полезность, а потери или затраты критерии максимизации заменяются соответствующими критериями минимизации.

Выбор того или иного принципа снятия неопределенности и соответствующего принципа оптимизации принадлежит ЛПР, при этом использование принципов, опирающихся на понятие математического ожидания вида 1, как правило, существенно упрощает математическое решение задачи по сравнению с формальными трудностями, возникающими в случаях введения критериев 3 и 4 вида.

1.3.2. Применение имитационных моделей для учета факторов неопределенности

Для учета случайных параметров и факторов неопределенности при решении задачи предлагается использовать средства имитационного моделирования, не усложняя линейную модель [63]. Известно, что в имитационных моделях хорошо реализуются вероятностные и динамические характеристики системы, однако сами по себе такие модели не находят оптимального результата, а лишь служат средством дополнительного анализа системы [106,107].

Таким образом, комбинируя при решении задачи методы линейного программирования (для поиска оптимального значения параметров системы) и имитационного моделирования (для последующего анализа и корректировки этих параметров), мы используем преимущества каждого из них. Кроме того, для учета непредвиденных событий, связанных с неопределенностью исходных данных, предлагается использовать анализ рисков системы транспортировки и рисков изменения проекта строительства, с учетом которых корректируется задача линейного программирования выбора оптимальных транспортных схем (описание приведено во 2 главе).

Для соединения линейной и имитационной моделей необходимо определить структуру исходных данных и характер их взаимодействия в результате работы алгоритма [63].

В общем виде схема принятия решения может выглядеть следующим образом:

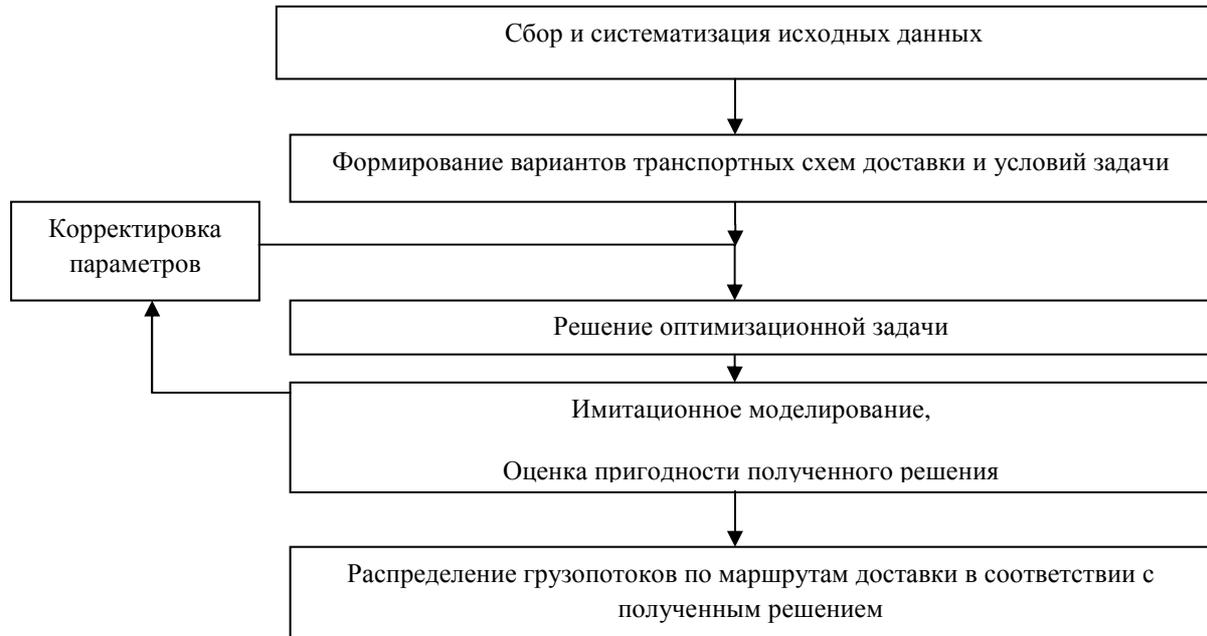


Рисунок 1.3 - Возможная схема оптимизационно-имитационного алгоритма.

Основными данными определяющими работу системы являются:

- сетевая структура моделируемой системы (транспортной сети);
- основные переменные, используемые в моделях
- результаты решения линейной задачи (входные переменные для имитационной модели)
- полученные параметры в ходе имитационного моделирования, которые корректируют задачу линейного программирования.

Алгоритм, представленный на схеме можно описать следующим образом [63]:

На первом шаге решается оптимизационная задача распределения грузопотоков по маршрутам доставки по критерию минимума общих затрат при базовых условиях с учетом увязки по срокам доставки, пропускной способности

участков доставки, технологических ограничений по видам транспорта и хранения.

На втором шаге производится исследование динамики функционирования системы доставки грузов по выбранным маршрутам на имитационной модели с учетом влияния случайных событий и взаимодействия элементов системы, не учтенных в оптимизационной модели. Например, с учетом случайных отклонений (Pc_{ijts} , $Pcap_{ijs}$, $P\tau_{ijts}$ - полученных на s -м шаге имитации) соответствующих величин C_{ijt} , Cap_{ijt} , τ_{ijt} , а также Xp_{ijts} (величины потерь ресурсов типа j на участке i в период t , полученная на s –м шаге оптимизации), и Zp_{lts} (величины потерь ресурсов в точке l в период t , полученная на s –м шаге оптимизации) и др. Определяется новое значение функции цели F_s .

На третьем шаге корректируются исходные данные оптимизационной модели распределения грузопотоков по маршрутам доставки с учетом результатов моделирования.

На четвертом шаге полученное решение вновь подается на вход имитационной модели и определяются динамические характеристики вновь полученной системы доставки грузов.

На пятом шаге ЛПР на основе сравнения полученных временных и стоимостных характеристик с допустимыми проводит сравнительный анализ систем доставки грузов S_p и S_{p+1} (значений функции цели F_s и F_{s-1} и анализа изменения вероятностных характеристик системы) и принимает решение: продолжить корректировку системы или остановиться на полученном решении. Решение продолжать корректировку означает переход к третьему этапу

На шестом шаге после принятия на 5-м этапе решения о прекращении работы модели фиксируются переменные, определяющие доставку различных типов грузов по участкам доставки в требуемый период X_{ijt} , Y_{ijt} и Z_{ijt} .

Исходные данные оптимизационной модели на третьем шаге при этом могут быть скорректированы различными способами.

1.3.3. Представление в стохастической форме (адаптивная схема решения) оптимизационной задачи формирования транспортных схем

С каждым вариантом решения ЗЛП, характеризуемым набором параметров $X = [x_1 \dots x_n]^T$, связаны числовые параметры $f_j(X, \omega)$, $j=1..J$, зависящие также от случайных воздействий и динамики функционирования системы и получаемые с использованием имитационной модели в зависимости от поведения среды ω .

Получение наиболее приемлемого плана транспортировок подразумевает поиск таких решений X , при которых среднее значение параметра $f_j(X, \omega)$ принимает наименьшее значение при различных значениях характеристик среды, а также определенных ограничениях на значения остальных параметров. Поэтому в качестве критерия оптимальности с учетом стохастического характера переменных выступают условия достижения экстремума математического ожидания целевой функции, задающей вероятность достижения цели при различных альтернативах. Это позволяет снять неопределенность и сформулировать соответствующие критерии вероятностной оптимизации:

$$F^*(x) = Mf(x, \omega) \rightarrow \min, \quad (1.33)$$

$$x \in X. \quad (1.34)$$

Одним из способов вычисления функции цели (1.33) с учетом всевозможных вариантов состояния среды, а также с учетом динамики самой системы является построение имитационной модели и «проигрывание» этих характеристик. Очевидно, что вычисление целевой функции (1.33) требует проведения некоторого количества экспериментов, в зависимости от сложности модели. Функция цели (1.33) представляет собой нелинейную функцию, кроме того она не имеет аналитического представления, поскольку вычисляется с помощью имитационной модели (т. е. задана алгоритмически).

Очевидно, что универсальным методом решения является полный перебор вариантов. Решение таких задач на практике часто сводится к многократно повторяющимся циклам моделирования, анализа и оценки полученных данных, корректировки параметров. Такой способ решения является не только слишком длительным и непроизводительным с точки зрения затрат машинного времени, но

и не всегда может привести к удовлетворительным результатам. Обосновать полученные результаты трудно, так как непонятно в какой мере качество функционирования системы еще может быть улучшено. Поэтому актуальной является задача построения математически обоснованных процедур целенаправленного перебора для их последующего улучшения и оптимизации.

Другими словами необходимо реализовать механизм адаптации решения к поведению среды с использованием имитационной модели.

Известно, что задачи нелинейного программирования успешно решаются с помощью градиентных методов. Градиент функции, т.е. вектор

$$\text{grad } F(x) = (\partial F/\partial x_1, \dots, \partial F/\partial x_n) \quad (1.35)$$

характеризует направление возрастания функции $F(x)$ в точке x , а вектор с противоположным знаком (антиградиент) – направление убывания. Поэтому, если $\text{grad } F(x)$ известен, поиск минимума функции происходит согласно соотношениям:

$$x_i^{s+1} = x_i^s - \rho^s \frac{\partial F(x^s)}{\partial x_i}, i = 1 \dots n; s = 0, 1, \dots, \quad (1.36)$$

где ρ^s – некоторое неотрицательное число, называемое величиной шага спуска, $X^0 = (x_1^0, \dots, x_n^0)$ – произвольное начальное приближение; $X^s = (x_1^s, \dots, x_n^s)$ – приближение после s шагов (итераций). Согласно (1.36) сдвиг точки S осуществляется в направлении антиградиента с некоторым шагом ρ^s .

Вычисление градиента обычно предполагает непрерывность и дифференцируемость исследуемой функции. Однако, с учетом того, что $F^*(x)$, определенная (1.33), в рассматриваемой задаче задана алгоритмически, точное значение градиента неизвестно.

Кроме того, ничего нельзя сказать о выпуклости или вогнутости функции цели $F^*(x)$, а значит, градиентные поисковые методы могут застревать в локальных экстремумах.

Целевая функция и ограничения в рассматриваемой задаче заданы на дискретном множестве и не обладают свойством непрерывности, поэтому необходимо использовать алгоритмы, не использующие предположений о

непрерывности целевых функций и ограничений. В работе [85] показано, что в случае овражных функций с локальными экстремумами, для решения применяются метод случайного поиска и его вариации. В сочетании с направленным поиском элемент случайности обеспечивает выход алгоритма из локальных экстремумов.

Здесь предлагается использовать метод стохастических квазиградиентов [44], при которых направление перебора вариантов определяется итерационным процессом

$$x_i^{s+1} = x_i^s - \rho^s g^s, \quad (1.37)$$

где $X^0 = (x_1^0, \dots, x_n^0)$ и ρ^s по-прежнему начальное приближение и величина спуска, а g^s - некоторый случайный вектор, математическое ожидание которого совпадает с градиентом или квазиградиентом функции $Mf(x, \omega)$.

Таким образом, итерационный процесс поиска решения задачи организован посредством направленного имитационного моделирования. Вектор близкий к градиенту функции определяется по результатам нескольких имитационных экспериментов в этой точке следующим образом:

В результате проведения эксперимента в точке X^0 запоминаются не только значение итоговой функции цели, но и общие затраты на каждом участке перевозки с учетом случайных отклонений, потерь, дополнительных затрат и пр. Функция цели вычисляется по нескольким экспериментам и с учетом (1.33) представляет собой:

$$Mf(x, \omega) = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} M(c_{it}) * x_{it}. \quad (1.38)$$

Тогда вектор $M(C)$ - и есть нужный нам случайный вектор $\nabla f(x_0)$, близкий к градиенту $Mf(x, \omega)$. Случайность его определяется тем, что он получен лишь по некоторому количеству имитаций, а не по всем возможным значениям параметров среды, поскольку вместо значений $Mf(x, \omega)$ в процессе имитационного моделирования наблюдаются отдельные случайные реализации величин $f(X, \omega)$ (отсутствует возможность точного вычисления $Mf(x, \omega)$).

Описанный метод обеспечивает поиск на всем пространстве аргументов функции, не учитывая ограничений (1.34), в задаче присутствуют как ограничения – равенства, так и неравенства. В оптимизационных задачах с ограничениями выбор направления спуска сопряжен с необходимостью постоянной проверки того, что новое значение x_{s+1} должно также, как и предыдущее x^s удовлетворять системе ограничений задачи.

По результатам моделирования корректируются также правые части ограничений-неравенств (b_{ji}). В этом случае ЛПР выбирает итоговый вид ограничений для решения задачи: либо использует средние по имитациям значения, либо минимальные – для обеспечения наименьшего риска (такой принцип называется принципом полной сатисфакции).

В работе [73] предложены различные методы решения задач с ограничениями: метод штрафных функций (которые, однако, приводят к дополнительной овражности целевой функции), метод проекции градиента (проекции вектора градиента на границу области ограничений), методы возможных направлений [46], линеаризации целевой функции и др.

Существуют методы решения задач нелинейного программирования основанные на линеаризации целевой функции в окрестности точки X^0 (метод Фанка-Вульфа), переходя таким образом к решению задачи линейного программирования.

$$F^* = F^0 + \nabla f(x^0) * (x^s - x^0) \quad (1.39)$$

При нахождении минимума линейной функции F^* получается направление приращения вектора решения $(x-x^0)$. При этом для нахождения оптимального шага движения вдоль этого направления необходимо минимизировать λ целевую функцию, которая задается имитационной моделью.

$$F(x^0 + \lambda(x^s - x^0)) \longrightarrow \min \quad (1.40)$$

Этого мы сделать не можем, поэтому с учетом кроме того ограничений равенств примем найденное значение x^s за новое решение (или $\lambda=1$) и вновь попытаемся минимизировать функцию уже в окрестности этой точки.

Такой алгоритм аналогичен описанному в п. 1.3.2 алгоритму взаимодействия оптимизационной и имитационной моделей.

Кроме того, для того чтобы минимизировать влияние потерь в процессе транспортировки на сроки доставки ресурсов можно произвести корректировку общих потребностей ресурсов с учетом потерь, полученных по результатам имитаций

$$P^0 p_{jt} \leq P^s p_{jt} \leq P^0 p_{jt} + \sum_{i,t} X p_{ijt} \quad (1.41)$$

Искусственно увеличивая потребности в ресурсах мы в итоге получаем большие суммарные затраты, но меньший риск недоставки в срок.

Следует отметить, что проведение имитационных экспериментов с изменением независимых и не оказывающих влияние на другие параметры переменных (тарифы и время доставки) в среднем не приводит к существенному изменению значения целевой функции. Поэтому учитывать эти параметры в оптимизационно-имитационном алгоритме нецелесообразно. Следует принимать во внимание факторы, оказывающие системное влияние на процесс транспортировки и на другие параметры, такие как потери ресурсов и дополнительные заказы ресурсов, изменение пропускной способности и связанные с этим задержки.

Еще одним градиентным методом решения задач с ограничениями равенствами и неравенствами является метод возможных направлений [46]. Идея его заключается в том, что среди всех возможных направлений в точке X^s выбирают то, вдоль которого функция $F^*(x, \omega)$ убывает быстрее всего, и затем осуществляют спуск вдоль этого направления. В произвольной точке X^s , удовлетворяющей ограничениям задачи (1.34) определяется такое направление, двигаясь вдоль которого можно сделать шаг конечной длины ρ^s и уменьшить значение функционала, не выходя при этом за пределы допустимого множества.

То есть, решая задачу вида:

$$\nabla f(x^s)^T * y_{ijt} \rightarrow \min \quad (1.42)$$

с учетом ограничений вида

$$\sum_{i \in I} a_{ij} y_{ij} \leq 0; j \in J \quad (1.43)$$

$$\sum_{i \in I} k_{ik} y_{ij} = 0; k \in K \quad (1.44)$$

и нормирующего условия

$$-1 \leq y_i \leq 1; i \in I \quad (1.45)$$

определяется оптимальное направление корректировки решения задачи, y_i – является возможным направлением спуска, т.е. направлением оптимального приращения вектора решения.

Ограничения (1.43) должны соответствовать активным ограничениям неравенствам первоначального решения – тем, которые для текущего решения x^s являются равенствами. По результатам имитационного эксперимента вычисляется остаточная пропускная способность участков перевозки, которая является правой частью ограничений (1.43) (при этом для активных ограничений остаточная пропускная способность будет равна 0). Ограничения-равенства (1.44) соответствуют структурным ограничениям задачи линейного программирования.

Затем определяется длина шага ρ^s для приращения вектора решения. Одним из методов определения шага является следующий:

Первоначально ρ^s принимается равным единице, однако после вычисления нового значения решения X^{s+1} , производится сравнение $f(X^{s+1})$ и $f(X^s)$, если $f(X^{s+1}) \leq f(X^s)$, решение X^{s+1} фиксируется и алгоритм переходит к следующему шагу. В противном случае шаг уменьшается вдвое до тех пор, пока новая функция цели не будет меньше предыдущей. Таким образом, шаг уменьшается вблизи точки экстремума.

Оптимальный шаг спуска может вычисляться из выражения:

$$F^*(x^s + \rho^* y^s) \rightarrow \min \quad (1.46)$$

с учетом ограничений исходной задачи. Однако, в такой постановке задача сводится к решению задачи (1.42) и получению такого же решения. Для получения отличных решений следует варьировать шаг ρ^s .

И, следовательно, новое значение вектора X^{s+1} определяется следующим образом:

$$X^{s+1} = p^s * y^s + X^s \quad (1.47)$$

Таким образом, на каждом шаге задача определения нового значения вектора X^s состоит из двух этапов: выбора направления и выбора длины шага при движении по этому направлению.

Общий алгоритм решения задачи с использованием имитационной модели следующий [60] (представлен на рисунке 1.4):

1 шаг. Генерация первого приближения решения - варианта распределения грузопотоков X^0 по маршрутам доставки. Получается путем решения задачи линейного программирования в детерминированной первоначальной постановке с учетом аналитически заданных ограничений.

2 шаг. Проводится исследование динамики функционирования системы доставки грузов по выбранным маршрутам на имитационной модели с учетом влияния случайных событий и взаимодействия элементов системы, не учтенных в оптимизационной модели.

По результатам нескольких реализаций имитационной модели определяется $F^*(X^s) = M(f(x, \omega))$, одновременно запоминаются значения переменных C_{iv} , b_{it} по участкам перевозки.

3 шаг. Исходя из результатов имитаций, вычисляется статистически полученный вектор, $\nabla f(x_s)$ близкий к градиенту функции $F^*(x)$ в точке X^s . Если $|\nabla f(x^s)| \leq \varepsilon$ (где ε определяет уровень точности), конец – полученное решение X^s и есть итоговое, иначе переход к шагу 4.

4 шаг. Определяется оптимальное направление спуска, путем решения оптимизационной задачи (1.42);

5 шаг. Определяется шаг p^s изменения вектора решения, описанным выше способом;

6 шаг. Производится вычисление нового вектора решения согласно (1.43);

7 шаг. С использованием имитационной модели вновь определяется значение $F^*(X^{s+1})$ (т.е. $M(f(x^{s+1}, \omega))$).

Проверяется близость решения к оптимальному:

$$F^*(X^s) - F^*(X^{s+1}) \leq \alpha, \quad (1.48)$$

(где α – требуемый уровень точности)

Если ограничение (1.48) выполняется, решение найдено, если нет, осуществляется переход к шагу 3.

8 шаг. В случае нахождения на 7 шаге оптимального решения, фиксируются переменные, обеспечивающие это решение.

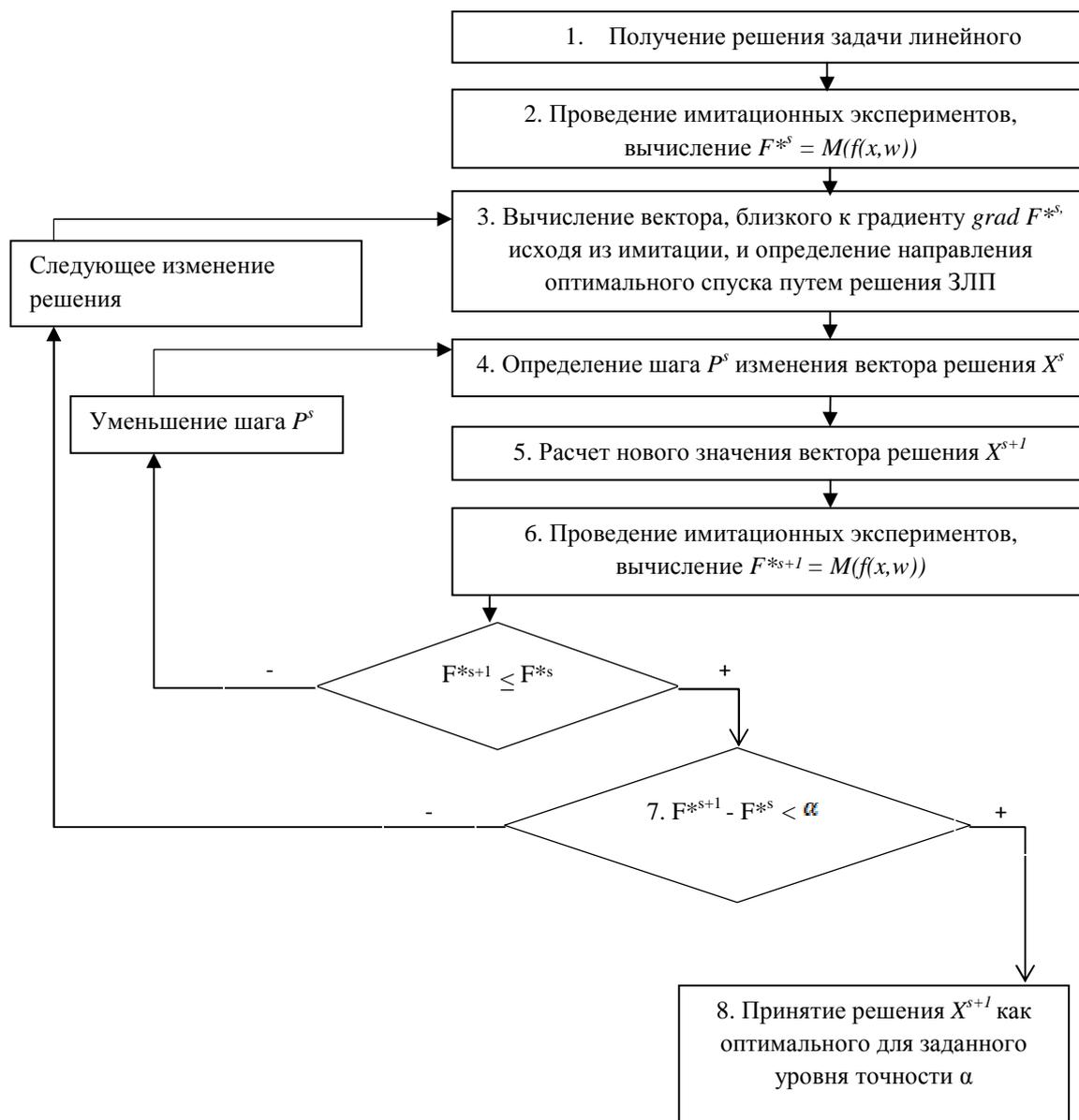


Рисунок 1.4 - Общий алгоритм решения задачи с использованием имитационной модели.

Таким образом, для решения задачи предлагается алгоритм [56], использующий взаимодействие методов линейного программирования и имитационной модели. При реализации этого алгоритма задача сводится к

решению оптимизационной задачи для получения первоначального решения, и последовательному улучшению вектора решения на основании вектора, близкого к градиенту целевой функции. Этот вектор рассчитывается по результатам нескольких экспериментов с имитационной моделью.

Выводы к главе 1

1. На основе проведенного анализа факторов, влияющих на формирование схем доставки грузов (факторов неопределенности) в нефтегазовой отрасли, для решения задачи оптимизации формирования транспортных схем доставки грузов в труднодоступные регионы строительства предложена оптимизационно-имитационная модель линейного математического линейного программирования, позволяющая минимизировать затраты и потери при доставке грузов. Комбинируя при решении задачи методы линейного программирования (для поиска оптимального значения параметров системы) и имитационного моделирования (для последующего анализа и корректировки этих параметров), можно использовать преимущества каждого из них для получения оптимального решения и таким образом учитывать случайные факторы, влияющие на поиск оптимального решения.

2. Для учета изменяющихся условий планирования (факторов) предложено рассматривать поставленную задачу оптимизации формирования транспортных схем доставки грузов в труднодоступные регионы строительства как задачу стохастического математического программирования оптимизации формирования транспортных схем доставки грузов в M-постановке. В качестве критерия поставленной задачи в стохастической постановке используется критерий минимума математического ожидания затрат при различных поведеньях внешней среды в процессе транспортировки. В такой постановке задача становится задачей нелинейного программирования и может быть решена с помощью градиентных методов. Оценка градиента целевой функции при этом производится по результатам имитационных экспериментов. Оптимизационно-имитационный алгоритм, основанный на таком подходе обладает свойством адаптивности к

изменяющимся условиям планирования доставки грузов и сходится к оптимальному решению.

2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ И АНАЛИЗА РИСКОВ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА ТРАНСПОРТНЫХ СХЕМ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

2.1. Принципы анализа рисков и факторы риска

Одним из критериев оценки участков транспортировки является анализ рисков, который, применительно к поставленной задаче, предполагает всесторонний, более широкий разбор непредвиденных ситуаций по проекту: в первую очередь качественный, а затем и количественный. Количественный анализ может включать в себя широкий спектр методов оценки, в том числе обозначенных выше. Цель анализа рисков, как инструмента, заключается не в нахождении точного оптимального решения, а в предоставлении ЛПР (лицам, принимающим решения) наглядной картины возможных последствий при различных принятых вариантах проекта, и соответственно возможности принимать более обоснованные решения в соответствии с критериями конкретной задачи.

В Российской Федерации существуют государственные стандарты [26, 27], рассматривающий менеджмент рисков как неотъемлемую часть устоявшейся практики менеджмента, анализ рисков – важная часть управления инвестиционными проектами [48,49]. Менеджмент рисков является итеративным процессом, состоящим из этапов, которые обеспечивают постоянное улучшение процесса принятия решений. Их эффективное применение зависит от опыта и знаний специалистов, а также их способности принимать решения, руководствуясь предложенными рекомендациями, а не просто ориентируясь на соблюдение последовательности выполнения установленных этапов. Основные характеристики процесса менеджмента рисков при реализации проектов показаны на рисунке 2.1.

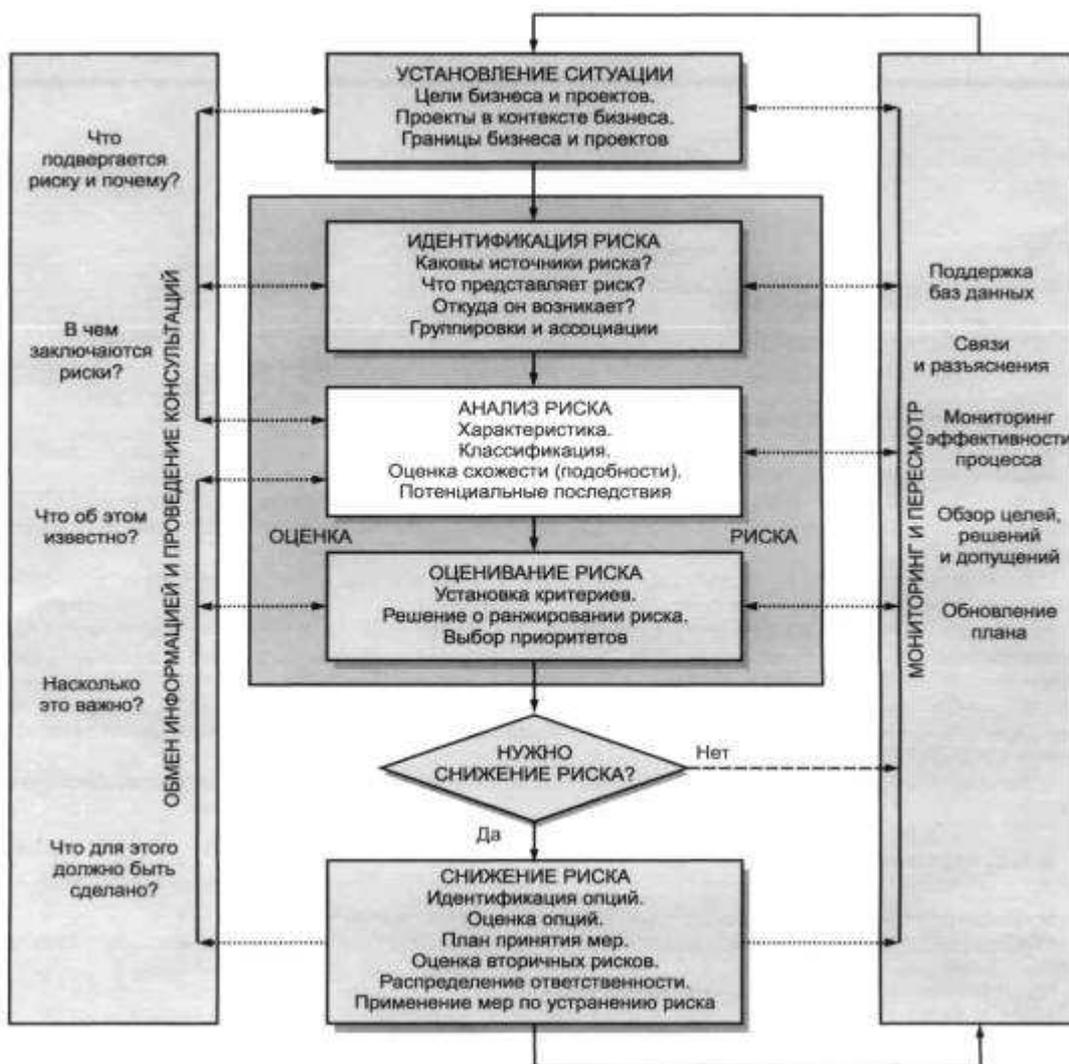


Рисунок 2.1 - Схема процесса менеджмента рисков проектов

В общем случае риск характеризуется как возможностью (вероятностью) возникновения в ходе проекта неблагоприятных ситуаций, так и их последствиями (убытки, ущерб и т.д.).

Тогда предполагается, что управление рисками это [1]:

- способы уменьшения вероятности наступления негативных событий и последствий от них с помощью мероприятий, которые требуют разумных затрат;
- способы учета последствий неопределенностей при реализации проекта, максимально точная оценка результатов инвестиционной деятельности.

Анализ проектных рисков представляет собой процесс, состоящий из следующих этапов:

- Идентификация (выявление) и качественный анализ рисков;

- Количественная оценка рисков;
- Выбор методов и инструментов управления рисками;
- Применение выбранных методов и инструментов;
- Оценка результатов.

Качественный анализ необходим для того, чтобы определить факторы риска, этапы и работы, при выполнении которых он возникает, установить потенциальные области риска, после чего идентифицировать все возможные риски. Задача количественного анализа состоит в численном измерении влияния рискованных факторов проекта на поведение критериев его эффективности.

Известно, что основные методы устранения или уменьшения рисков это:

1. Упразднение риска (отказ от проекта или его переделка);
2. Страхование (возмещение ущерба, возникшего в случае реализации риска, из страховых фондов, формируемых за счет страховых взносов).
3. Предотвращение и контроль риска (принятие мер организационных, технических и др., снижающих: 1) вероятность реализации риска 2) величину ущерба в случае риска; передачу и перераспределение рисков через заключение договоров и через организационную форму бизнеса
4. Поглощение риска (принятие ущерба в случае реализации риска участником или всеми участниками проектной деятельности). В рамках этого метода может предусматриваться перераспределение ущерба между некоторыми или всеми участниками проекта, снижение последствий реализации рисков за счет гарантийных и резервных фондов и пр.

2.2. Модель и алгоритм (принципы) оценки и анализа рисков при оптимизации схем доставки грузов

Определение факторов риска и первоначальная качественная их оценка, в свою очередь, определяют те параметры модели, изменения которых должны быть оценены на имитационной модели [61]. Другими словами, риск-анализ взаимодействует с оптимизационно-имитационной моделью, определяя

исследуемые непредвиденные события, и критерии их оценки, и включает в себя имитационную модель как инструмент количественной оценки. Учитывая это, принципы работы такой схемы оценки и анализа рисков при оптимизации схем доставки грузов можно представить так, как показано на рисунке 2.2



Рисунок 2.2 - Взаимодействие оптимизационной, имитационной моделей и методов анализа рисков.

Предполагается с использованием оптимизационно-имитационной модели [61]:

- *провести количественный анализ рисков.* Применительно к задаче данной работы включает в себя оценку материальных и временных потерь по рисковым ситуациям (и изменение функции цели оптимизационной задачи) для принятия решений по принятию, снижению или устранению риска, анализ чувствительности критериев задачи к изменению переменных.

- *определить критерии принятия риска* на основе полученных оценок. Риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из особенностей конкретного проекта (экономические, временные, социальные и пр.) Риск является приемлемым, если ради выгоды, получаемой от выбора варианта проекта, подразумевающего этот риск, компания готова на него пойти. Таким образом, приемлемый риск представляет собой некоторый компромисс между уровнем безопасности и возможностями его достижения.

- *принять решение по управлению рисками* (страхование, снижение или принятие). При принятии рисков предполагается использовать их комплексную оценку в качестве критерия оптимизационной задачи и соответственно проводить имитационное моделирование с учетом рискованных факторов.

Приведем кратко **качественный анализ рисков** рассматриваемой системы, выполненный по причинам их возникновения, выделим итоговые последствия факторов неопределенности. Известно, что [113], в логистических системах (которой, по сути, является рассматриваемая система) по источнику возникновения риски можно поделить на:

- **Внутренние риски в системе**, связанные непосредственно с транспортировкой груза на конкретном перевозочном средстве, включая пожары, дорожно-транспортные происшествия, угон или пропажу транспортного средства, взрывы, повреждения при погрузке, укладке, выгрузке, приеме товара; утрату или повреждение тары, упаковки, утрату или неправильное оформление документов, халатность персонала и т.д.;

- **Риски, воздействующие на грузы извне**: ДТП, климат, запреты властей, неплатежеспособность или банкротство субподрядчиков, ошибки в оформлении процедур платежей, задержка в пути, утрата или повреждение груза при хранении, складировании и других операциях на складах и при подготовке к транспортировке, высокая концентрация груза, низкий уровень квалификации работников;

- **Риски, воздействующие на внешние объекты из-за происшествий с грузом**: жертвы аварий, несчастный случай, ожидание выполнения операций,

повреждение собственности подрядчика, повреждение чужого имущества, таможенные риски и т.д.;

Основными последствиями рискованных событий, связанными с транспортировкой на объекты строительства являются:

- Превышения сметной стоимости работ;
- Нарушения сроков поставки и соответственно строительных работ;
- Риск изменения проекта и соответственно потребности в ресурсах;
- Риск наступления гражданской ответственности.

Риск превышения сметной стоимости работ. Причинами этого риска могут быть ошибки при проектировании, неспособность подрядчика обеспечить эффективное использование ресурсов, изменение условий реализации проекта (повышение цен, налогов и пр.) В частности:

- увеличение цен на ресурсы, приобретаемые на последующих стадиях проекта выше уровня, который прогнозировался при составлении сметы проекта;
- необходимость выделения средств на непредусмотренные проектом мероприятия;
- выплаты надбавок за срочность выполнения работ и поставок, заменяющих сорванные партнерами, с которыми отношения в процессе реализации проекта могут быть сорваны.

Причинами несвоевременного завершения строительства и задержки ввода объектов в эксплуатацию могут быть ошибки при проектировании, изменение внешних условий. Последствия такого риска в конечном итоге ведут к дополнительным затратам.

Гражданская ответственность возникает в связи с ущербом, нанесенным юридическим или физическим лицам в процессе доставки МТР

Определив источники возникновения рискованных ситуаций, в первую очередь **выделяем страхуемые риски** – обычно это страхование стоимости товара от порчи и потерь при транспортировке, а также страхование транспортных затрат. Таким образом мы избавляемся от риска потерь, но при этом в целевую функцию необходимо добавить соответствующие затраты по страхованию. Стоит отметить,

что затраты по страхованию грузов обычно существенно ниже возможных потерь и многие логистические компании, компании экспедиторы принимают его целесообразным.

Количественный анализ рисков предполагает в первую очередь определение комплексных убытков, связанных с рисками. Для определения ущерба в ряде случаев (таких как риск повышения тарифов на доставку продукции) оценка производится достаточно просто – прямым расчетом убытков на участке перевозки и пересчетом функции цели оптимизационной задачи, в некоторых же требует комплексных расчетов. Примерами таких рисков являются риск или порчи продукции при перевозке вследствие краж стихийных бедствий, несоблюдения условий доставки, форс-мажорных обстоятельств, и пр. Если потери при несоблюдении условий доставки можно застраховать, как было описано выше, то форс-мажорные риски обычно не страхуются. Такие потери кроме непосредственных затрат на приобретение новой продукции влекут за собой возможные задержки по срокам строительства, дополнительную нагрузку на участки перевозки, доплаты за срочную доставку и пр. Кроме того, на закупку и доставку одних и тех же ресурсов, в последующий период времени требуется больше средств с учетом дисконтирования. Результаты таких событий предлагается оценивать с использованием имитационного моделирования транспортных потоков. Методология системной динамики предполагает моделирование основных взаимозависимостей в системе для изучения ее во времени, позволяя учитывать влияние стохастических факторов. Одна реализация полного цикла работы системы во времени с учетом воздействия фактора риска позволит вычислить комплексные денежные и временные потери.

После определения возможного размера ущерба, *анализируются возможности устранения риска*. Такие возможности тесно связаны с источником и характером его возникновения. К примеру, повышение стоимости доставки продукции может быть вызвано наличием неучтенных операций и повышенным индексом-дефлятором, изменением эксплуатирующей организации и пр. Такие ситуации можно попытаться предсказать и учесть в модели, однако

при проектировании сложно запланировать мероприятия по их устранению. Другие риски, такие как возможность обледенения морских путей раньше срока, скопление неотправленных ресурсов в порту и их порчу в итоге из-за отсутствия места крытого хранения можно решить заранее, запланировав строительство баз временного хранения (строительство дополнительных транспортных путей, выбор более дорогого, но более надежного перевозчика, и пр.) Если существуют возможные меры по устранению или снижению вероятности или последствий риска, необходимо оценить их целесообразность и выбрать оптимальные к применению.

Предположим, есть N возможных мероприятий по снижению риска, каждый из них характеризуют показатели:

U_i – размер затрат по реализации i -го мероприятия;

$M_0(N)$ - математическое ожидание ущерба до проведения i -го мероприятия;

$M_i(N)$ - математическое ожидание ущерба после проведения i -го мероприятия.

Оптимальным будет являться мероприятие, позволяющее при минимальных затратах снизить вероятность или последствия риска до приемлемого уровня. Учитывая изложенное, выбор мероприятий по устранению рисков предлагается проводить, основываясь на следующем выражении [12]:

$$\eta_i = \frac{U_i}{M_0(N) - M_i(N)}, \quad (2.1)$$

где параметр η_i отражает соотношение между затратами и последствиями противорисковых мер, а значит их экономическую целесообразность (мероприятия целесообразны когда $\eta_i < 1$). В общем случае мероприятие, для которого η_i окажется наименьшим, следует считать наиболее эффективным.

Кроме того, при принятии решений по снижению рисков используют принцип ALARP [113, 114] (as low as reasonably practicable) – риск должен быть снижен настолько, насколько это практически целесообразно, принцип «разумной достаточности». Смысл заключается в том, что предприняты все возможные меры, чтобы уменьшить риски до уровня, при котором их дальнейшее снижение

требует несоразмерно больших затрат. Принцип распространен в большей степени применительно к системам с техническими рисками. Однако в рассматриваемой задаче временные потери, то есть задержки доставки грузов могут приводить к критическому срыву сроков строительства. На основе этих данных оцениваются ожидания ущербов (возможно не только материальных) и ЛПР принимает решение о целесообразности проведения мероприятий по снижению риска.

Таким образом, оптимизационно-имитационная модель как инструмент анализа позволяет оценить последствия возможных событий, неопределенных на этапе проектирования, их влияние на результат решения задачи, и (с учетом вероятности или экспертной оценки) принять обоснованное решение либо по устранению или уменьшению рисков, либо по их принятию. При этом принятие рисков должно происходить в случае, когда либо от него никуда не деться, либо когда принятие риска (его уровень) может быть выгодно даже с учетом последствий события. Принятие рисков, в свою очередь, может подразумевать использование их количественных оценок в качестве параметров скорректированной оптимизационной задачи.

2.2.1. Постановка многокритериальной оптимизационной задачи формирования транспортных схем с учетом рисков

Рассмотрим выбор оптимальных транспортных схем на основе анализа принятых рисков логистической системы. Оптимизационная модель решения такой задачи выглядит следующим образом [64]:

В качестве целевой функции принят минимум общих затрат, представленный в (1.1), обозначим его как F^* :

$$F^* = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} (X_{ijt}(C_{ijt} + C_{otij}) + Y_{ijt}C_{prijt}) + \sum_{l \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} Ch_{ljt}Z_{ljt} + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} Ch^*_{jt}Z^{**}_{jt} \rightarrow \min \quad (2.2)$$

Полученное решение задачи в данном случае основано на неточных или усредненных исходных данных, которые впоследствии могут измениться и неизвестно, насколько полученное решение чувствительно к таким изменениям. В

рамках анализа рисков рассматриваются изменения исходных данных, приводящие к неоптимальности решения и разного рода чрезвычайные ситуации, меняющие условия задачи. В результате чего исходная оптимизационная задача корректируется.

После принятия решений о страховании одних рисков, избавления или снижения других, соответствующие затраты предполагается учесть в оптимизационной модели. Обобщая, целевую функцию F с учетом принятия мер по минимизации рисков можно представить следующим образом:

$$F = F^* + \sum_{i=1..N} St_i + \sum_{i=1..N} U_i \rightarrow \min \quad (2.3)$$

где S_{ij} – затраты по страхованию на единицу груза при перевозке по i -му участку, St_i - затраты по страхованию происшествий на i -м участке, U_i – затраты по устранению рисков на i -м участке.

Риски, возникающие непосредственно при транспортировке грузов, присутствуют в разной степени на всех возможных маршрутах доставки, поэтому полностью избежать их невозможно. Однако можно получить оптимальное решение, учитывающее вероятность этих рисков и их последствия, включая их в оптимизационную модель.

Факторы риска, по которым не найдено мер их снижения (либо эти меры приняты неэффективными) и будут составлять интегральную оценку риска на участке перевозки. По этим факторам следует определить вероятность возникновения и возможный размер ущерба. Окончательное решение о принятии рисков подразумевает их учет в качестве критериев оптимизационной задачи. Так как вероятность реализации риска часто пропорциональна грузопотоку по участку, варьируя грузопотоки можно регулировать окончательный уровень риска.

По каждому маршруту или участку доставки выводится свой интегральный уровень риска R_{it} и минимизация общего риска, связанного с процессом транспортировки выливается в критерий оптимизационной задачи:

$$F_r = \sum_{i=1..N} \sum_{j=1..M} \sum_{t=1..T} R_{it} X_{ijt} \rightarrow \min \quad (2.4)$$

Как видно из этого выражения, принимается, что уровень потерь пропорционален количеству груза, перевозимого по участку.

Недостаток ресурсов в конечной точке, как следствие временных задержек, может вести кроме материальных потерь (учтенных в основном критерии задачи), к критическому срыву сроков строительства, невыполнению договорных обязательств и пр. Тогда возможный недостаток ресурсов в конечной точке определяет еще один критерий задачи, по которому оценивается уровень риска (F_{rt}). Уровень временного риска оценивается по значению функции F_t . В самом простом виде эту функцию временного риска можно записать следующим образом:

Для определенного момента времени t^*

$$F_t = K_{ep} \sum_{t=1..t^*} (X_{Njt-1} - Pp_{jt}) \quad (2.5)$$

где K_{ep} - коэффициент временного риска, определяющий переход от количественного значения недостатка ресурсов к некоторому уровню риска (определяется ЛПР), X_{Njt-1} - количество ресурсов перевезенных в предыдущий момент времени по последнему участку перевозки, т. е. доставленных в момент t на объект строительства. Тогда критерий временного риска в зависимости от изменения функции F_t при изменении параметров по участкам перевозки следующий:

$$F_{rt} = \sum_{i=1..N} \sum_{j=1..M} \sum_{t=1..T} Q_{it} X_{ijt} \rightarrow \min \quad (2.6)$$

где Q_{it} интегральный уровень временного риска по участку перевозки i в период времени t .

Рассмотрим, формирование интегральных уровней риска R_{it} и Q_{it} . Для оценки ущерба неблагоприятных событий, принимаемой в качестве параметра оптимизационной модели мало оценить вероятность события и математическое

ожидание потерь [113]. Необходимо также понимать и учитывать зависимость изменения функции цели и результатов решения задачи от колебаний значений параметров и предсказуемость поведения этих параметров.

В экономических исследованиях используют разные методы количественной оценки проектных рисков. Применительно к рассматриваемой задаче предлагается использовать анализ чувствительности [1].

В ходе анализа чувствительности происходит последовательно единичное изменение переменных (при этом только одна переменная меняет свое значение и на этой основе пересчитывается новая величина используемого критерия). Затем оценивается процентное изменение критерия по отношению к базисному случаю и рассчитывается показатель чувствительности, представляющий собой процентное изменение критерия к изменению переменной на один процент (так называемая эластичность изменения показателя).

$$\mathcal{E}_\phi = (\Delta C(\phi, \Delta\phi) / C(\phi)) / (\Delta\phi / \phi), \quad (2.7)$$

где \mathcal{E}_ϕ – показатель чувствительности – эластичность, $C(\phi)$ и ϕ – базовые значения исследуемых параметров (например, общие затраты и значение исследуемой переменной соответственно), $\Delta C(\phi, \Delta\phi)$ и $\Delta\phi$ – приращения соответствующих переменных. Таким же образом вычисляются показатели эластичности по всем изменяемым переменным по каждому участку перевозки.

Каждому рисковому событию соответствует изменение определенных переменных задачи. В данном случае изменяемыми переменными будут C_{ijt} – стоимость перевозки по i -му участку j -го ресурса период времени t , Cap_{it} – пропускная способность i -го участка в период времени t , Δt_{it} – длительность перевозки по i -му участку (параметр имитационной модели, обратно пропорционален пропускной способности), а также потери P_{ijt} , понесенные при потере грузов типа j на участке перевозки i период времени t . Они включают в себя затраты, связанные с несвоевременной доставкой вновь приобретенных ресурсов, и косвенные потери, возникающие при дополнительной нагрузке на участки, рассчитываются эти потери с использованием имитационной модели. По каждому событию определим, какие переменные изменяются, а также изменение

значения функции цели по каждому показателю с учетом неизменных первоначальных объемов перевозки X_{ijt} .

На следующем шаге, используя результаты проведенных расчетов, осуществляют экспертное ранжирование рисков по степени потерь (например, очень высокие, высокие, средние, низкие) и экспертную оценку прогнозируемости изменения значений переменных в зависимости от предсказуемости наступления соответствующего события (например, высокая, низкая, средняя). Далее эксперт может построить так называемую «матрицу чувствительности», позволяющую выделить наименее и наиболее рискованные для проекта переменные (события).

Степень изменения переменной, исследуемой на чувствительность, определяется либо экспертно, либо исходя из вероятностных оценок (математического ожидания изменения). Для более полного анализа, особенно это касается ситуаций, для которых вероятность возникновения мала, либо ее трудно оценить, вычислим приращение функции цели для нескольких вариантов изменения переменной. Целесообразным представляется использовать для расчета критические изменения переменной (пессимистический и оптимистический варианты), а также среднее значение изменения параметра.

После вычисления показателей чувствительности функции цели приведем количественные оценки к баллам по единой 10-балльной шкале. В данном примере расчет произведен, исходя из среднего изменения исследуемого параметра, критические же значения используются для экспертной оценки и возможной корректировки показателя чувствительности. Кроме того, в отдельную графу матрицы чувствительности следует внести степень прогнозируемости и вероятность возникновения фактора риска. В случае если такую вероятность оценить невозможно, то есть лицо, принимающее решение, находится в состоянии неопределенности, предлагается использовать принцип «недостаточного основания» Лапласа. Ни одно из состояний природы – произойдет событие или не произойдет – не считается приоритетным и вероятности событий принимаются равными [98]. То есть в случае одного

фактора риска с единственным возможным исходом вероятность его появления будет равна 0,5.

На одном участке может быть несколько изменяемых переменных, по каждой из них будет получен свой уровень риска, после чего их необходимо свести в интегральную оценку риска на участке. Известно, что цепь сильна настолько, насколько сильно ее самое слабое звено. Поэтому за уровень риска на участке примем максимальный по всем событиям. При этом следует учитывать вероятность возникновения нескольких событий одновременно. Тогда, принимая, что все события независимы друг от друга, рассчитываем максимальный риск при возникновении 2-х и более событий одновременно по известным формулам умножения вероятностей.

Для оценки чувствительности модели к изменению переменных удобно использовать имитационную модель системы транспортировки, которая позволяет «проиграть» поведение системы во времени, и показывает как изменение материальных затрат, так и временные задержки поставки ресурсов.

В соответствии с описанной методологией [57,58] рассмотрим пример построения матрицы чувствительности, которая строится по всем участкам перевозки, рассчитывается изменения функций F и F_i (таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Пример матрицы чувствительности.

N п/п	Факторы риска	Изменяемые параметры по каждому участку	Изменение переменной модели, %			Изменение значения целевой функции (потери), %		
			Мин.	Среднее (вероятное)	Макс.	Мин.	Среднее (вероятное)	Макс.
1	Увеличение тарифов и сроков доставки, вследствие неполной информации о тарифах и требуемых операциях	$C_{ijt} \tau_{ij}$	5	25	50	2	15	25
2	Задержки на участках перевозки в связи с природными условиями	τ_{ij}	10	30	100	20	50	80
3	Потери ресурсов вследствие стихийных бедствий	$X_{pot_{it}}$	1	5	10	4	10	25
4	Задержки ресурсов вследствие позднего начала работы автозимника	Cap_{it}	2	15	30	5	20	40
5	Несоблюдение сроков строительства дороги, вследствие чего - задержка ресурсов, и уменьшение пропускной способности	Cap_{it}	2	15	30	3	20	50

Продолжение таблицы 2.1.

N п/п	Факторы риска	Изменяемые параметры по каждому участку	Отношение процента изменений функции цели к проценту изменения параметра			Чувствительность функции и цели к изменению параметра	Возможность прогнозирования фактора риска
			Мин.	Среднее (вероятное)	Макс.		
1	Увеличение тарифов и сроков доставки, вследствие неполной информации	$C_{ijt} \tau_{ij}$	0,4	0,6	0,5	1	средняя (определяемая статистически и экспертно)
2	Задержки на участках перевозки в связи с природными условиями	τ_{ij}	2,0	1,7	0,8	8	высокая (определяемая статистически)
3	Потери ресурсов вследствие стихийных бедствий	$X_{pot_{it}}$	4,0	2,0	2,5	10	очень низкая
4	Задержки ресурсов вследствие позднего начала работы автозимника	Cap_{it}	2,5	1,3	1,3	6	низкая
5	Задержки и увеличение тарифов на доставку, вследствие неквалифицированной работы подрядчиков	Cap_{it}	1,5	1,3	1,7	6	средняя (статистически неопределяемая)

Таким образом, с учетом основной функции цели задачи (2.2) или (2.3) и «рисковых» критериев (2.4) и (2.6) оптимизационная задача сводится к многокритериальной. Существует большое количество подходов к решению многокритериальных оптимизационных задач [77], многие из них сводятся к нахождению множества Парето-оптимальных решений, а затем выбора с учетом предпочтений ЛПР. Для сужения пространства решений с учетом предпочтений ЛПР используют, например, различные виды сверток и нормировки критериев. При этом важно определить относительные веса критериев.

Обычно предлагается использовать традиционные виды сверток (обобщенных критериев) отдельных критериев, например [94]:

$$F(x) = \sum_i \alpha_i f(x_i) \quad (2.8)$$

$$F(x) = \prod_i \alpha_i f(x_i) \quad (2.9)$$

$$F(x) = \min_i \alpha_i f(x_i) \quad (2.10)$$

$$F(x) = \max_j \min_i \alpha_i f(x_i) \quad (2.11)$$

где α_i – коэффициенты важности критериев (весовые коэффициенты), определяемые в большинстве случаев субъективно; $\sum \alpha_i = 1$; $f(x_i)$ – частный i -й показатель (критерий) эффективности.

Выбор того или иного вида свертки определяется характером взаимосвязей составляющих ее критериев (равнозначные, доминирующие и т.п.), а также некоторыми специальными ограничениями на область значений свертки, вытекающими из специфики конкретной задачи и предпочтений ЛПР.

При этом, при решении многокритериальных задач с противоречащими или частично противоречащими критериями не может существовать единственного оптимального решения. Оптимальные решения в таких задачах получают с учетом формализованного мнения о ситуации лиц, принимающих решение.

2.3. Модель анализа рисков изменения проектных решений и построения адаптивной схемы доставки грузов

2.3.1. Постановка задачи

Решив задачу планирования системы доставки грузов на длительный период впоследствии можно столкнуться ситуацией, когда вариант строительства объекта меняется в ходе проекта в зависимости от внешних факторов, пересмотра инвестиционной стратегии и пр. При этом когда часть грузов уже доставлена на объект строительства, а по новому проекту эти ресурсы не требуются, это может приводить к значительным потерям – доставленные ресурсы оставлены теперь на хранение, потрачены средства на доставку и закупку. В случае экстренного недостатка ресурсов, дополнительные затраты появляются вследствие экстренной доставки или невыполнения работ в срок.

Для целей исследования важно рассмотреть такие риски изменения проектных решений, в результате которых меняются требуемые объемы, номенклатура, маршруты и сроки доставки грузов.

Изменения проектных решений могут возникать вследствие:

- пересмотра инвестиционной стратегии компании из-за изменения цен на газ, экономической ситуации в стране, принятия решений об альтернативных инвестициях и пр.
- пересмотра проекта в части применения более современных материалов и оборудования,
- переноса сроков строительства и др.

Для получения оптимального решения, устойчивого к таким изменениям проектных решений предлагается рассматривать процесс эволюции внешней среды (изменения проектных решений) как марковский случайный процесс, который порождает пучок взаимосвязанных сценариев эволюции среды с вероятностными оценками возникновения возможных ситуаций. Предположим что возможно конечное число вариантов проектных решений, принятия решений об изменении проекта производятся по прошествии некоторого отчетного периода (календарный год). Кроме того, вероятности изменения проекта могут

изменяться с течением времени. Таким образом, марковский случайный процесс в рассматриваемой задаче будет нестационарным с конечным числом состояний и дискретным временем.

Известно, что процесс считается марковским [19], если вероятность перехода системы в следующее состояние зависит лишь от текущего состояния и не зависит от предыстории системы. Другими словами, можно ввести матрицы $P(t) = \|p_{ij}(t)\|$ условных вероятностей того, что система, находящаяся в момент t в состоянии i в момент $t+1$ окажется в состоянии j . Так как она обязательно должна

в результате перехода попасть в некоторое состояние, то
$$\sum_{j=1}^N p_{ij} = 1 \quad (2.12)$$

Принципиальное отличие такого подхода (использования в качестве прогнозов заданного извне набора сценариев) заключается в том, что пользователь (заказчик, инвестор) может отразить в расчете собственные представления о рисках, связанных с возможными неблагоприятными изменениями экономической ситуации в будущем

Состояние внешней среды в момент времени $t = 0, 1, \dots, T$ задается матрицей, отражающей плановую потребность в ресурсах типа j на конечном участке в данный период времени $t - Pp_{jt}$.

Введем случайный процесс $\omega(t) \in \Omega(t)$, $t=0, 1, \dots, T$, состояния которого определяются матрицей (Pp_{ji}) . В соответствии с марковским свойством переход $i \rightarrow j$ среды из состояния $\omega(t) = i \in \Omega(t)$ в момент времени t в состояние $\omega(t+1) = k \in \Omega(t+1)$ в момент $t+1$ происходит с вероятностью $p_{ij}(t) = P\{\omega(t+1)=j | \omega(t)=i\}$, $i \in \Omega(t)$, $j \in \Omega(t+1)$, где
$$\sum_{j \in \Omega(t+1)} p_{ij} = 1, \quad \forall i \in \Omega(t).$$

Начальное состояние процесса известно: $\omega(0) = \omega_0$. Эволюцию среды будем рассматривать как траекторию (динамику) случайного процесса $\omega(t)$, $t = 1, \dots, T$ (рисунок 2.3).

Вероятность состояния $\omega(t)$ в момент времени t : $\pi_i(t) = P\{\omega(t) = i\}$, $i \in \Omega(t)$, зависит лишь от того, в каком состоянии находилась внешняя среда в предшествующий момент времени $t-1$, и не зависит от того, в каких состояниях

она находилась в более ранние моменты времени ($t = 0, 1, \dots, t-2, \dots$). Так как, переходные вероятности, зависят от времени, что означает, например, что изменение проектных решений менее вероятно на поздних стадиях строительства (или наоборот), для задания процесса необходимо определить множество Ω и матрицы переходных вероятностей для каждого периода времени t ($p_{ij}(t)$).

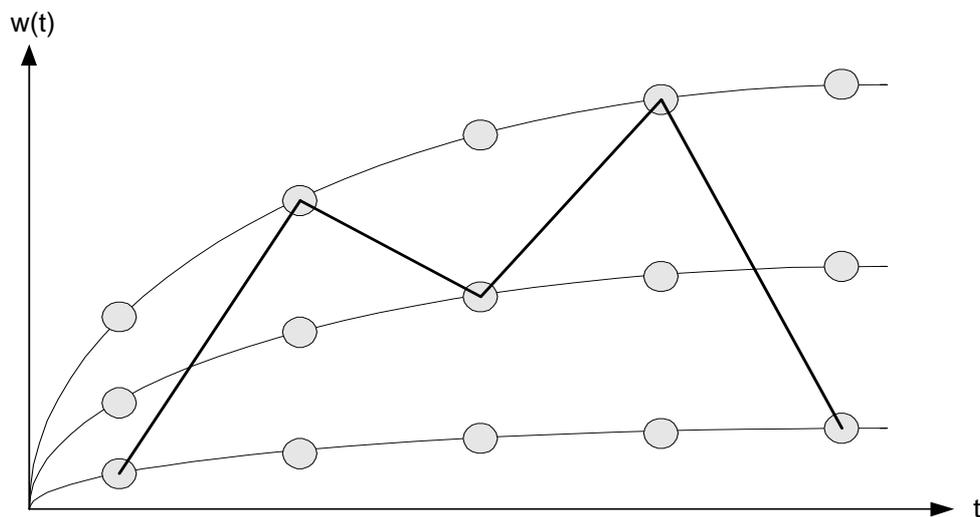


Рисунок 2.3 - Возможные состояния внешней среды и одна из реализаций случайного процесса изменения состояния внешней среды.

Процесс $\omega(t)$ считается неуправляемым, то есть решения, принимаемые при транспортировке не влияют на плановые потребности ресурсов в конечной точке. Кроме того, $\omega(t)$ – неоднородная марковская цепь с дискретным временем, то есть нестационарный марковский случайный процесс с конечным числом состояний и дискретным временем.

Процесс $\omega(t)$ отражает в модели совокупность сценариев изменения внешней ситуации, которую с точки зрения пользователя (эксперта, исследователя, ЛПР) необходимо рассматривать при принятии стратегических решений как внешний фон развития системы. Для описания процесса необходимо задать варианты изменения проектных решений в каждый период времени. Очевидно, что изменения проекта могут быть не дискретны, т. е. любая из переменных может изменяться в любую сторону непрерывно. Однако для удобства описания системы удобно привести возможные состояния к некоторому количеству дискретных состояний системы. Причем, чем меньше это количество,

тем проще и легче производить расчеты, т. е. при построении пространства возможных состояний необходимо находить компромисс между дискретизацией системы и количеством вычислений.

Для полного описания эволюции внешней среды необходимо задать вероятности перехода между состояниями за один временной интервал. Определение вероятностей может быть выполнено, например, по методу анализа иерархий (МАИ), или другими методами (различные варианты экспертных оценок). Пример использования МАИ для определения параметров марковского случайного процесса на основе экономических параметров среды описан в [65]. Применительно к поставленной задаче будем считать, что вероятности переходов из состояния в состояние являются исходными данными задачи, наряду с первоначальными проектными решениями.

Метод анализа иерархий. Метод анализа иерархий (МАИ) [88,98] является одним из методов измерения сложной совокупности экспертных суждений и способом правильно организовать получение этих суждений с целью достижения большего приближения к реальности, объективности и согласованности оценок.

Изучаемую систему представляют в виде иерархии, которая изображается графом связей между элементами уровней. Нулевой уровень иерархии указывает цель исследования. Входной информацией для расчетов, выполняемых СППР, служат матрицы парных сравнений приоритетов элементов нижнего уровня иерархии, с точки зрения элементов верхнего (предыдущего) уровня, составляемые экспертами (или руководителями). По этим матрицам составляется вектор относительных приоритетов, являющийся собственным нормированным вектором матрицы суждений, который чаще всего, однако вычисляется по следующему приближенному алгоритму: в матрице суждений необходимо суммировать элементы каждой строки и нормализовать сумму делением ее на сумму всех элементов матрицы; сумма полученных результатов будет равна единице; первый элемент результирующего вектора будет приоритетом первого объекта, второй – второго и т.д. Оценки руководителя могут оказаться логически несогласованными. Для контроля согласованности вычисляют индекс

согласованности [98], в зависимости от значения которого эксперт либо пересматривает свои решения, либо нет. Последовательное вычисление приоритетов элементов от верхних уровней к нижним позволяет численно оценить влияние всех включенных в иерархию элементов на возможные исходы. Сравнивая полученные приоритеты для элементов последнего уровня можно установить соотношения в их значимости с точки зрения руководителя.

Влияние приоритетов нижнего уровня иерархии на исходную цель (верхний уровень иерархии) в МАИ выражается через вектор нормированных абсолютных приоритетов $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$: $\sum_{i=1}^n \pi_i = 1$, которые можно интерпретировать как субъективные меры (вероятности) предпочтения.

В общем случае для каждого состояния среды $i \in \Omega(t)$, $t=0,1,\dots,T$ приходится строить свою иерархию для определения вероятностей переходов в состояния $j \in \Omega(t+1)$.

Итак, вероятности переходов в нестационарном марковском процессе отыскиваются с помощью экспертных оценок. Включение экспертной информации в формализованную математическую модель позволит отразить в ней те существенные факторы, которые сделают ее более адекватной представлениям ЛПР о возможных событиях, связанных с риском изменения объемов поставок ресурсов на объект строительства.

2.3.2. Характеристики процесса стратегического управления

В рассматриваемой задаче эволюция внешней среды и процесс транспортировки ресурсов по маршрутам рассмотрены отдельно. Эволюцию макросреды описывает марковская цепь с множеством состояний $\Omega(t)$, $t = 1, \dots, T$ и матрицами вероятностей переходов $\|p_{ij}\|$, $i \in \Omega(t)$, $j \in \Omega(t+1)$.

При таком вероятностном описании эволюции внешней среды задача состоит в выборе таких управлений в каждом состоянии, чтобы возникающая в результате этого марковская цепь, отражающая принимаемые решения и экономические характеристики плана грузопотоков, имела оптимальные свойства

[105]. Речь идет о том, чтобы научиться определять оптимальные стратегии управления процессом транспортировки на множестве *всех возможных* сценариев эволюции макросреды, которые определяются марковской цепью $\omega(t)$. Выбор маршрутов транспортировки должен быть адаптирован к возможным изменениям проекта строительства.

Каждому переходу системы из состояния $i \in \Xi(t)$ в состояние $j \in \Xi(t+1)$ при выборе управления $u_i \in U_i(t)$ соответствует модельные затраты $r_{ij}(u_i, t)$, которые отражают баланс положительных и отрицательных факторов, связанных с таким переходом. Цель управления процессом сводится к получению минимальных суммарных затрат. Схематично формирование затрат в процессе доставки ресурсов показано на рисунке 2.4.

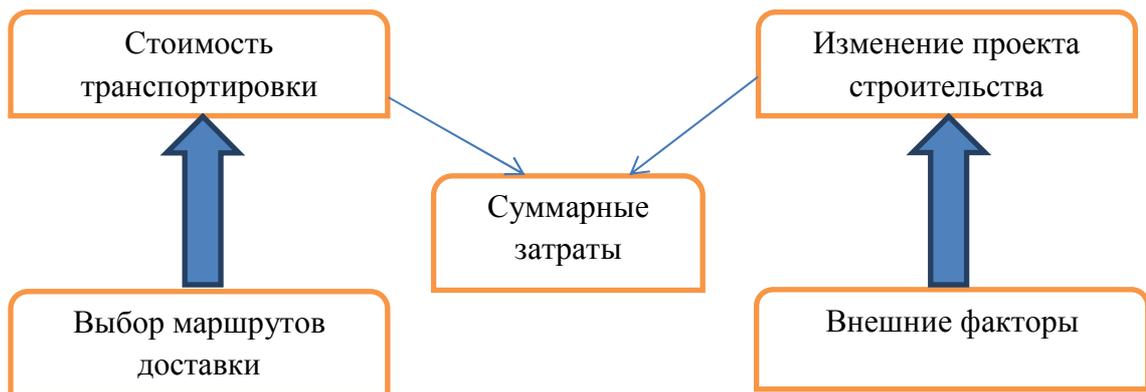


Рисунок 2.4 - Формирование затрат в процессе транспортировки.

На каждом этапе ожидаемые затраты за один переход внешней среды из состояния в состояние $r_{ij}(u_i, t)$ складываются из стоимости транспортировки, потерь на участке перевозки, потерь от недостатка ресурсов и потерь от возникновения избытка ресурсов при переходе среды из состояния в состояние (изменении проекта строительства). Эта функция аналогична (1.1), однако кроме того учитывает штраф от нехватки ресурсов при смене проекта, рассчитывается для всех возможных изменений проекта в текущий момент времени, т.е. переходов среды из состояния в состояние, и вычисляется следующим образом:

$$r_{ij}(u_i, t) = F_{ij}(u_i, t) + N_{ij}(u_i, t), \quad (2.13)$$

где $F_{ij}(u_i, t)$ – определяет суммарные затраты на транспортировку и затраты на длительное хранение аналогично функции цели (1.1), а $N_{ij}(u_i, t)$ – определяет затраты от недостатка ресурсов при смене проекта строительства.

$$N_{ij}(u_i, t) = Sh(t) \times D(u_i, t), \quad (2.14)$$

где $Sh(t)$ – штраф за недостаток единицы ресурса; $D(u_i, t)$ – недостаток ресурсов в момент t при реализации управления u_i .

Вероятность $p_{ij}(t)$ перехода среды в состояние $j \in \Xi(t+1)$ зависит только состояния в предыдущий момент времени $i \in \Xi(t)$ и не зависит от состояний в более ранние моменты времени $t-1, t-2, \dots, 0$.

Задача состоит в том, чтобы так выбрать управления, чтобы полученная цепь обладала оптимальными свойствами. Стоит подчеркнуть, что оптимальный выбор управлений вовсе не приводит к однозначно определенным финансовым результатам, как это имеет место в детерминированных моделях. В данном случае он обеспечивает достижение наилучших финансовых результатов лишь в среднем, в балансе возможных в будущем позитивных и негативных последствий. При этом видоизменяется проблема риска. Компания может идти на обоснованный риск, если это с достаточно высокой вероятностью может принести ей удовлетворительные выигрыши.

При выборе в состоянии i управления $u_i \in U_i(t)$ ожидаемые затраты за один переход внешней среды из состояния $i \in \Xi(t)$ в момент времени t в любые возможные состояния в момент времени $t+1$ определяется как:

$$q_i(u_i, t) = \sum_{j \in \Xi(t+1)} p_{ij}(t) r_{ij}(u_i, t). \quad (2.15)$$

2.3.3. Построение адаптивной стратегии выбора маршрутов с учетом эволюции внешней среды

Центральным в предлагаемом алгоритме является предположение о том, что в любом состоянии и на каждом шаге ЛПР стремится к *максимизации математического ожидания результата* на оставшемся отрезке времени.

Решением является выбор для *каждого состояния* $\omega(t)$ марковской цепи *оптимального управления* $u(\omega, t)$, то есть определение объемов ресурсов определенного типа, которые должны быть отправлены в момент попадания в данное состояние и маршрутов их доставки. Если компания примет такую стратегию, то ей гарантируется на оставшемся промежутке времени максимум среднего (ожидаемого) эффекта.

Принятие оптимальной в этом смысле стратегии в каждом состоянии не гарантирует достижение абсолютно минимальных затрат в конце рассматриваемого периода. Этого не может гарантировать никакая стратегия. Но следование оптимальному решающему правилу ("данная стратегия в данном состоянии") позволит *достичь в среднем лучших результатов по сравнению с другими стратегиями.*

Особенность подхода состоит в применении многоэтапной стохастической процедуры выбора оптимальных стратегий, привязанных к состояниям системы и среды, с критерием максимума математического ожидания эффекта (минимизации средних затрат).

В многоэтапных стохастических моделях имитируется гипотетический процесс принятия решений в зависимости от текущей ситуации, попав в которую компания выбирает свою стратегию при точном знании текущего состояния системы и макросреды и при вероятностной неопределенности будущего. Порождаемые стратегии в итоге являются не программными (связанными только с фиксированными моментами времени), а адаптивными, то есть выбор стратегии обусловлен состоянием, в котором находится система в данный момент (с вероятностью, определяемой расчетом) и субъективными вероятностями возможных переходов внешней среды в другие состояния на следующем шаге, которые зависят от этого выбора.

Решение в каждый момент $t = 0, 1, \dots, T$ принимается только на основе информации о текущем состоянии системы и среды с использованием гипотез относительно возможных переходов среды в другие состояния. Компания не знает будущего, но делает предположения о возможных изменениях условий среды

(параметры проекта строительства в зависимости от внешних условий) и принимает решения, оценивая возможные последствия.

Под *адаптивной стратегией* подразумеваются правила выбора управлений $u_i \in U_i(t)$ в момент времени t в каждом состоянии $i \in \Xi(t)$.

В каждом состоянии i при известных показателях внешней среды и известном состоянии системы транспортировки (которое определяется количеством уже отправленных и доставленных грузов и общих затрат) ЛПР стремится к минимизации математического ожидания суммарных затрат на всем оставшемся временном интервале $[t, T]$:

$$M[F_{pot}(t)] \rightarrow \min, t=0, 1, \dots, T-1. \quad (2.16)$$

Состояние управляемой системы перед каждым шагом характеризуется:

- текущим проектом строительства (и, следовательно, потребностью в ресурсах в зависимости от времени – Pr_{jt} и Pp_{jt});
- количеством грузов типа j , доставленных в точку строительства;
- избытком ресурсов типа j в конечной точке Z_{ji}^* ;
- количеством грузов в промежуточных точках хранения Z_{ijt} ;

При переходе системы к следующему шагу под влиянием управлений ЛПР изменяется количество груза, доставленного на объект строительства. В зависимости от изменения среды (параметров проекта) изменяется потребность в строительных ресурсах.

Решение задачи выбора адаптивной стратегии с критерием общих затрат основано на следующем рекуррентном соотношении динамического программирования [105]:

$$M[F_{pot_i}(t)] = \min_{u_i \in U_i(t)} \left[q_i(t, u_i) + \sum_{j \in \Xi(t+1)} p_{ij}(t) M[F_{pot_j}(t+1)] \right], \quad (2.17)$$

где: $M[F_{pot_i}(t)]$ — математическое ожидание общих затрат на временном слое t при выборе управления $u_i \in U_i(t)$ и условии, что система находится в состоянии $i \in \Xi(t)$; $q_i(t)$ - ожидаемые затраты за один переход из состояния i (см. (2.15)).

При этом для получения оптимального управления для каждого из возможных состояний в момент времени t необходимо решить задачу линейного программирования для получения оптимального распределения грузопотоков по маршрутам доставки с использованием имитационной модели (используя оптимизационно-имитационный алгоритм).

Произведем условную оптимизацию последнего шага: для последнего момента времени $t=T$ положим $M[Fpot_j(T)]=0, i \in \Xi(T)$,

$$(2.18)$$

Тогда

$$M[Fpot_i(T-1)] = \min_{u_i \in U_i(T-1)} [q_i(T-1, u_i)], i \in \Xi(T-1),$$

$$(2.19)$$

Тогда, с учетом (2.13), (2.15)

$$\begin{aligned} F_{t-1} &= \min_{u_i \in U_i(T-1)} [q_i(T-1, u_i)] = \min \left[\sum_{j \in \Xi(t+1)} p_{ij}(T-1) r_{ij}(u_i, T-1) \right] = \\ &= \min \left[\sum_{j \in \Xi(t+1)} p_{ij}(T-1) \times (F_{ij}(u_i, T-1) + N_{ij}(u_i, T-1)) \right], \end{aligned}$$

$$(2.20)$$

где вектор управлений U_i формально есть набор переменных $X_{ijt}, Y_{ijt}, Z_{ijt}$;

Следовательно для получения условного оптимального управления на последнем шаге необходимо минимизировать функцию:

$$\sum_{j \in \Xi(t+1)} p_{ij}(T-1) (F_{ij}(u_i, t) + N_{ij}(u_i, t)) \longrightarrow \min$$

$$(2.21)$$

для каждого из возможных комбинаций состояний системы и среды в момент $T-1$. Состояние системы, как было сказано, определяется количеством грузов в конечной точке, а это величина, строго говоря, непрерывная. Для возможности реализации вычислений область возможных значений этой величины нужно преобразовать в дискретный набор значений с некоторым шагом ΔX_{ijt} . Состояние среды определяется текущими параметрами проекта.

При минимизации функции цели (2.21) должны выполняться ограничения задачи линейного программирования в виде, описанном в 1 главе кроме ресурсных ограничений (1.2), (1.3), (1.5) (поскольку требуемое количество ресурсов в рассматриваемой постановке – случайная величина).

С учетом вероятности изменения потребности в ресурсах Pp_{jt} ресурсное ограничение примем исходя из максимально возможной потребности в ресурсах (при этом для плана с меньшей потребностью в функции цели будет учтена стоимость хранения избытка).

$$\forall j \in J, t^* \in T \quad \sum_{t=1}^{t^*} \sum_{i \in I_k} Y_{ijt} \geq \sum_{t=1}^{t^*} P^{\max} p_{jt}, \quad (2.22)$$

где $P^{\max} p_{jt} = \max_{n \in N} (P^n p_{jt})$, $P^n p_{jt}$ - потребность в ресурсах по поздним срокам сетевого графика для возможного проекта строительства n .

Переменная Z^{**}_{jt} вычисляется теперь для каждой из возможных потребностей в ресурсах $P^n p_{jt}$.

$$Z^{n**}_{jt} = \begin{cases} 0, Z^*_{jt} - (P^n r_{jt} - P^n p_{jt}) < 0 \\ Z^*_{jt} - (P^n r_{jt} - P^n p_{jt}), Z^*_{jt} - (P^n r_{jt} - P^n p_{jt}) \geq 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

Структурное ограничение (1.5) задачи линейного программирования для приобъектного склада будет выглядеть следующим образом:

$$\forall j \in J, t \in T \quad Z^*_{jt} = Z^*_{jt-1} + \sum_{i \in I_k} Y_{ijt} - \sum p_{ij}(T-1)Pp_{jt}, \quad (2.24)$$

где $p_{ij}(T-1)$ определяет вероятность изменения потребности в ресурсах.

Найдем путем решения оптимизационной задачи условное оптимальное управление для последнего шага, т. е. варианты оптимальных управлений для всех возможных состояний системы и среды в предпоследний момент времени.

После получения условного оптимального решения на последнем шаге необходимо произвести условную оптимизацию для момента (Т-2) с учетом найденных условных оптимальных управлений на шаге Т-1, далее для момента Т-3 и так далее, дойдя до начального момента времени. Для каждого из шагов найдем условное оптимальное управление при всех возможных значениях параметров среды и системы транспортировки.

В начальный момент состояние системы транспортировки и среды известно, таким образом, для первого шага можно получить безусловное оптимальное

управление с учетом вероятностей будущих изменений параметров проекта. Это и есть оптимальное управление (план транспортировок) для данного периода времени.

При изменении параметров проекта в будущем управления системой транспортировки изменяются исходя из рекомендаций, полученных на этапах условной оптимизации.

Выбор интервала планирования. Задача формирования транспортных потоков доставки МТР на объекты строительства рассматривается на фиксированном интервале времени, состоящем из заданного количества периодов. Интервал планирования поставок материально-технических ресурсов на объект строительства зависит от данных проектной документации, и принимается исходя из сроков реализации проекта. При этом, принимая во внимание, что в качестве состояний марковского случайного процесса рассматриваются достаточно крупные изменения проекта, интервал, в течение которого внешняя среда переходит из состояния в состояние, должен быть достаточно большим. Применительно к рассматриваемой задаче, с учетом сроков доставки грузов по маршрутам предлагается этот интервал принимать равным 1 году. Такой интервал обусловлен также тем, что подведение итогов деятельности компаний (в том числе бухгалтерских, закрытие договоров и пр.), а также планирование будущей деятельности обычно производится в конце календарного года.

Поскольку на выбранном интервале переходов из одного состояния марковского процесса в другое возможно совершить один и более цикл доставки ресурсов на объекты строительства (с учетом периодов работы участков транспортировки) нецелесообразно рассматривать системные эффекты, учитывающие принятие решения в текущем периоде, на следующие, поскольку доставляемые грузы предполагается использовать здесь и сейчас, предусмотрительная доставка за несколько лет ведет лишь истечению срока хранения ресурсов и возможности морального их старения. Следовательно, системные эффекты взаимосвязи между различными переходами в задаче не рассматриваются.

Управляющие переменные (компоненты вектора управлений).

В модели используются следующие управления, оказывающие влияние на значения критериев: векторы X_{ijt} , Y_{ijt} и Z_{ijt} отражают количество доставляемого груза по определенному участку перевозки в рассматриваемый период времени. В рассматриваемой выше задаче линейного программирования интервал t принимается меньшим, чем интервал смены состояний марковского случайного процесса, поэтому для каждого интервала нахождения в одном состоянии может быть решена задача линейного программирования. В зависимости от принятых решений, т.е. от принятого вектора управления с учетом воздействия случайных переменных, реализуемых с использованием имитационной модели, на каждом этапе формируется вектор параметров системы: количество поставленного груза на конечный участок, количество избыточных ресурсов, и количество потерь, т.е. ресурсов, которые нужно будет заново доставлять на объект строительства.

Таким образом, с учетом анализа рисков проектных решений алгоритм решения задачи формирования транспортных схем доставки грузов на длительном интервале строительства объекта сводится к следующему:

1. Задача долгосрочного планирования поставок ресурсов представляется задачей динамического программирования. При этом эволюция внешней среды описывается марковским случайным процессом с доходами. Задача решается рекуррентным методом для выбора на каждом шаге оптимального управления, приводящего к минимальным затратам “в среднем”

2. На каждом шаге рекуррентного алгоритма, т. е. на каждом временном интервале продолжительностью 1 год оптимальное решение получается с использованием описанного выше оптимизационно-имитационного алгоритма, а также анализа рисков для учета случайных факторов, возникающих непосредственно в процессе транспортировки.

Выводы к главе 2

1. На основе анализа существующих методов анализа рисков логистических систем и анализа рисков при проектировании разработаны модель

и алгоритм оценки и анализа рисков при оптимизации схем доставки грузов, который предполагает качественный, количественный анализ ситуации (выявление факторов риска, влияние их на результат решения задачи), а также алгоритм устранения или уменьшения рисков.

На основе количественного анализа факторов риска, который проводится с использованием анализа чувствительности целевой функции задачи к воздействиям внешней среды на каждом участке перевозки, разработана многокритериальная модель оценка рисков на участках перевозки, которая подразумевает формирование интегрального уровня риска по каждому участку перевозки. Существующие методы решения многокритериальных задач, так или иначе, ориентированы на принятие решения с учетом формализованного мнения эксперта. При решении поставленной многокритериальной задачи с использованием свертки критериев, ЛПР сознательно распределяет веса критериев (общих затрат и рисков), и таким образом имеет возможность контролировать уровень риска (уменьшать затраты, за счет повышения риска или наоборот).

2. Для учета в задаче риска изменения проектных решений в течение строительства и доставки грузов на объекты строительства предложено процесс изменения проектных решений (эволюцию внешней среды) представлять в виде неуправляемого марковского процесса. Применительно к поставленной оптимизационной задаче формирования оптимальных транспортных схем доставки грузов изменение проекта означает изменение объемов доставки ресурсов на объект строительства в определенные сроки. На основе метода динамического программирования для получения оптимальных решений на каждом этапе процесса транспортировки построена адаптивная стратегия выбора маршрутов с учетом эволюции внешней среды, следование которой позволяет достичь в среднем лучших результатов по сравнению с другими стратегиями.

ГЛАВА 3. ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА ТРАНСПОРТНЫХ СХЕМ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

3.1. Анализ принципов имитационного моделирования, выбор методологии для поставленной задачи

Цель имитационного моделирования состоит в воспроизведении поведения исследуемой системы на основе результатов анализа наиболее существенных взаимосвязей между её элементами или другими словами — разработке симулятора (англ. simulation modeling) исследуемой предметной области для проведения различных экспериментов [14,69].

К имитационному моделированию прибегают, когда [69]:

- дорого или невозможно экспериментировать на реальном объекте;
- невозможно построить аналитическую модель: в системе есть время, причинные связи, последствие, нелинейности, стохастические (случайные) переменные;
- необходимо симитировать поведение системы во времени.

Подавляющее большинство имитационных моделей логистических систем создаются с помощью занявших устойчивое место на рынке программных продуктов ПИМ для процессов с дискретными событиями, таких как Arena, AutoMod, eM-Plant, Enterprise Dynamics, Extend, ProModel, QUEST, Simul8 и WITNESS, а также с помощью универсального ПИМ AnyLogic. Сравнительно несложные учебные модели создаются также с помощью языка GPSS. Однако существуют системы и для моделирования непрерывных процессов, такие как iThink, Mathlab и др.

Для учета вероятностных факторов на участках транспортировки, дополнительного анализа поведения системы и учета полученных данных при решении задачи формирования транспортных схем доставки грузов предлагается воспользоваться средствами имитационного моделирования. Известно, что в имитационных моделях хорошо реализуются вероятностные и динамические

характеристики. Имитационная модель строится на базе статистического материала о работе транспортных систем, на организационных и технических особенностях работы транспорта на участках перевозки, не формализованных в оптимизационной модели.

Сложные транспортные схемы характеризуются наличием большого количества вероятностных факторов, определяющих процесс доставки грузов. Выбор маршрутов перевозки может быть произведен с помощью оптимизационной модели, однако учитывая структурную сложность, наличие обратных связей и растянутость проектов во времени предлагается алгоритм, основанный на взаимодействии оптимизационной и имитационной моделей для решения таких задач, а также структура оптимизационной модели.

Транспортная система (и ее имитационная модель) структурно состоит из 3-х элементов, в соответствии с линейной постановкой задачи: точки отправления груза, точки перевалки (хранения) груза и конечные точки. Комбинируя эти элементы можно конструировать или воссоздавать в модели транспортные сети различной структуры и сложности.

Имитационная модель системы доставки в целом может быть реализована различными методами (рисунки 3.1, 3.2): дискретно-событийное моделирование, системная динамика, агентное моделирование.

Агентное моделирование — относительно новое (1990-2000-е гг.) направление в имитационном моделировании, которое используется для исследования децентрализованных систем, динамика функционирования которых и вырабатываемые управления являются результатом индивидуальной активности членов группы. Цель агентных моделей — получить представление об этих глобальных правилах управления, общем поведении системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном поведении её отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в системе. Агент — некая сущность, обладающая активностью, автономным поведением, может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать с окружением, а также самостоятельно изменяться.

Дискретно-событийное моделирование — подход к моделированию, предлагающий абстрагироваться от непрерывной природы событий и рассматривать только основные события моделируемой системы, такие, как: «ожидание», «обработка заказа», «движение с грузом», «разгрузка» и другие. Дискретно-событийное моделирование наиболее развито и имеет огромную сферу приложений — от логистики и систем массового обслуживания до транспортных и производственных систем.

Системная динамика — парадигма моделирования, где для исследуемой системы строятся графические диаграммы причинных связей и глобальных влияний одних параметров на другие во времени, а затем созданная на основе этих диаграмм модель имитируется на компьютере. По сути, такой вид моделирования более всех других парадигм помогает понять суть происходящего выявления причинно-следственных связей между объектами и явлениями. С помощью системной динамики строят модели бизнес-процессов, развития города, модели производства, динамики популяции, экологии и развития эпидемии. Метод основан Джеймсом Форрестером в 1950 годах.



Рисунок 3.1- Методологии имитационного моделирования.

Принцип системной динамики применительно к имитационной модели позволяет проследить механизмы обратных связей в системе, взаимозависимости

переменных, рассматривая при этом систему достаточно укрупненно. В системной динамике любой имитируемый процесс рассматривается в виде определенных структурных образований, состоящих из уровней, связанных между собой управляемыми потоками. Уровни характеризуют накопление информации внутри системы. Потоки изменяют значения уровней, и регулируются управленческими решениями. Темпы изменения потоков между уровнями показывают, как изменяется уровень после принятия решения за интервал, равный шагу моделирования.

Модели дискретно-событийного типа при большей углубленности в описание отдельных элементов системы (железнодорожные станции, порты и пр.) могут показывать влияние принципа работы этих элементов на систему в целом. Такие модели часто используют при описании систем массового обслуживания. Однако реализация таких детальных моделей для реальных систем – длительный и трудоемкий процесс.



Рисунок 3.2 - Уровни абстракции видов имитационного моделирования.

В рассматриваемой задаче в первую очередь важно проанализировать систему целиком, с учетом взаимодействия с внешними факторами. Для этих целей удобно воспользоваться принципом системной динамики, а не простое моделирование отдельных элементов или величин, поскольку это метод более всех других помогает понять суть происходящего, выявления причинно-следственных связей между объектами и явлениями, позволяет проследить механизмы обратных связей в системе, неочевидные взаимосвязи переменных, рассматривая при этом систему достаточно укрупненно. Системная динамика рассматривает моделируемые объекты скорее как часть системы, акцентируя внимание на общих закономерностях, взаимосвязях внутри системы и с внешней средой, что позволяет моделировать структурно-сложные системы и системы с обратными связями [62].

3.2. Описание методологии системной динамики

Методология системной динамики базируется на предположении, что поведение (или история развития во времени) системы главным образом определяется ее информационно-логической структурой. Такая структурная схема содержит источники усиления временных задержек и обратных связей, подобных тем, которые встречаются в сложных системах. Особенностью моделей системной динамики является возможность формализовать механизмы обратных связей в рассматриваемой системе.

Другой аспект системной динамики заключается в том, что рассматриваемая система более эффективно представляется в терминах лежащих в ее основе потоков, нежели в терминах отдельных функций. Потоки людей, денег, материалов, заявок и оборудования, а также интегрированные потоки информации могут быть выявлены в любой системе.

Системно-динамическая модель состоит из набора абстрактных элементов, представляющих некие свойства моделируемой системы. Выделяются следующие типы элементов [103]:

- Уровни - характеризуют накопленные значения величин внутри системы. Это могут быть товары на складе, товары в пути, банковская наличность, производственные площади, численность работающих. На диаграммах изображаются прямоугольниками. Уровни – это чаще всего параметры системы, которые численно описывают состояние основных процессов в моделируемой системе и динамику которых хотим получить в результате.

- Темпы - скорости изменения уровней. Например, потоки материалов, заказов, денежных средств, рабочей силы, оборудования, информации. Изображаются сплошными стрелками.

- Вспомогательные переменные

- Функции решений - функции зависимости потоков от уровней. Функция решения может иметь форму простого уравнения, определяющего реакцию потока на состояние одного или двух уровней. Например, производительность транспортной системы может быть выражена количеством товаров в пути (уровень) и константой (запаздывание на время транспортировки).

- Каналы информации, изображаются штриховыми стрелками.

Программно реализовать модели системной динамики можно используя такие пакеты как Динамо, Имитак, STELLA, iThink, Vensim, Powersim, Matlab_Simulink, AnyLogic, и др. Компьютерная модель обычно представляется в виде блок-схемы, содержащей типовые функциональные блоки систем управления и управляемых объектов.

С формальной точки зрения программные пакеты, реализующие такие модели, описывают процесс численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

3.3. Структурная схема имитационной модели процесса доставки грузов на отдаленные и труднодоступные объекты строительства

3.3.1. Элементы логистической сети

Основными элементами логистической сети, кроме участков непосредственно транспортировки являются точки отправки ресурсов,

промежуточные точки и конечные точки маршрута. Схематично каждый из элементов выглядит следующим образом (рисунки 3.3, 3.4, 3.5) [62, 111]:

Начальные точки - элементы из множества I_o оптимизационной модели.

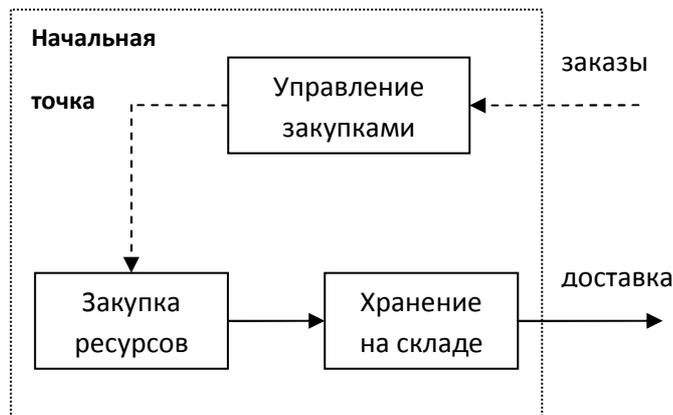


Рисунок 3.3 - Начальные точки.

Сплошными стрелками на схемах обозначены материальные потоки (перемещение ресурсов), пунктирными – потоки информации и управляющие воздействия.

В начальных точках генерируются требуемые объемы ресурсов в определенные периоды времени, которые далее поступают на участки перевозки. Эти объемы соответствуют X_{ijt}^v .

Промежуточные точки - элементы множества I_n оптимизационной модели.

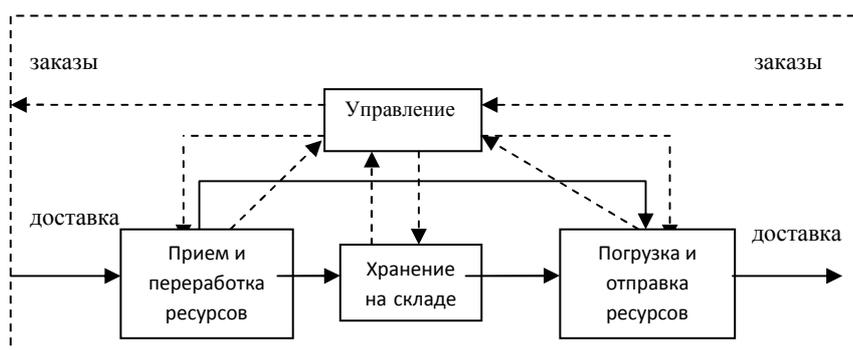


Рисунок 3.4 - Промежуточные точки.

Конечные точки - элементы множества I_k оптимизационной модели

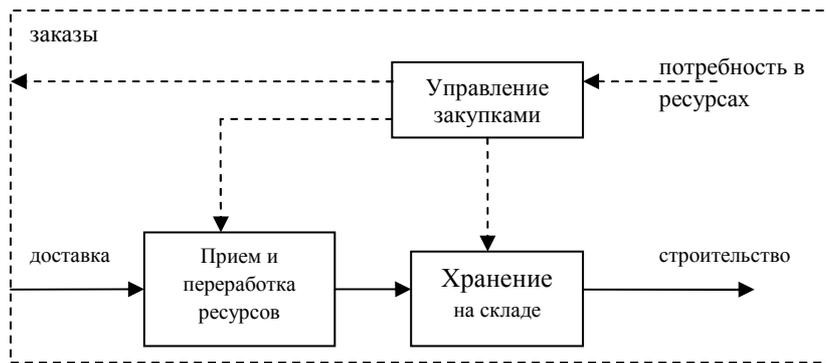


Рисунок 3.5 - Конечные точки.

В процессе работы программы непосредственно имитируется процесс прохождения грузов по маршрутам, в соответствии с разработанной схемой транспортной сети, основываясь на принципе фиксированных перемещений временных интервалов.

В момент начала функционирования имитационной модели на вход поступают данные о структуре системы, являющиеся результатом решения оптимизационной задачи, т.е. X_{ijt} - объемы грузов, поступающие на начальную точку маршрутов в определенные периоды времени, и U_{it} - нормативные объемы хранения грузов, а также исходные данные задачи, определяющие нормативные стоимость, длительность доставки и пропускные способности участков. Все эти переменные переводятся в параметры моделирования. Системное время наращивается дискретно в соответствии с выбранным приращением Δt .

В соответствующих блоках вырабатываются случайные числа и генерируются критические ситуации (аварии, потери, задержки в перевалочных пунктах и пр.).

3.4. Разработка имитационной модели системной динамики доставки грузов на отдаленные и труднодоступные объекты строительства

Рассмотрим построение модели системной динамики для задачи выбора вариантов транспортных схем для строительства крупного объекта. Такое строительство, и доставка соответственно, характеризуется длительностью, в качестве исходных данных имеем большое количество транспортных схем, однако исходные данные о стоимости доставки, пропускной способности и пр.

представлены неточно. Рассмотрим взаимосвязи на небольшом участке перевозки с учетом того, что плановые распределения грузопотоков уже найдены исходя из решения оптимизационной задачи.

Основными величинами, исследуемыми в результате моделирования являются итоговое количество доставленных ресурсов на точку строительства а также загрузки участков перевозки и связанные с этим возможные чрезвычайные ситуации: временные задержки, увеличение затрат, потери ресурсов.

Потери на всех участках перевозки влекут за собой либо недостачу грузов на участке строительства, что в большинстве случаев неприемлемо, либо дополнительную отправку ресурсов из начальной точки. В этом случае в модели возникает обратная связь. Дополнительный объем отправляемых ресурсов дает дополнительную нагрузку на участки перевозки, что может привести к затруднениям на этих маршрутах, которые, в свою очередь, могут способствовать задержкам и дополнительным потерям. Взаимодействия элементов системы при наличии обратных связей сложно учесть в оптимизационных моделях. Механизм такой обратной связи представлен на рисунке 3.6.

Основными уровнями имитационной модели системы транспортировки являются количество ресурсов в начальной точке, в промежуточных точках хранения и перевалки грузов, и в точке строительства. Изменение последнего определяется двумя факторами: темпом доставки грузов и темпом использования ресурсов, т.е. непосредственно строительством.

Темп доставки с одной стороны определен решением оптимизационной задачи, однако под влиянием случайных потерь, задержек ресурсов и возможных ограничений пропускной способности, а также обратных связей в системе (не учтенных оптимизационной моделью) будет варьироваться. Кроме того, темп отгрузки определяется возможностью отправки ресурсов, то есть наличием их на складе отправки и возможностью приема, т. е. количеством ресурсов на складе приема и его пропускной способностью.

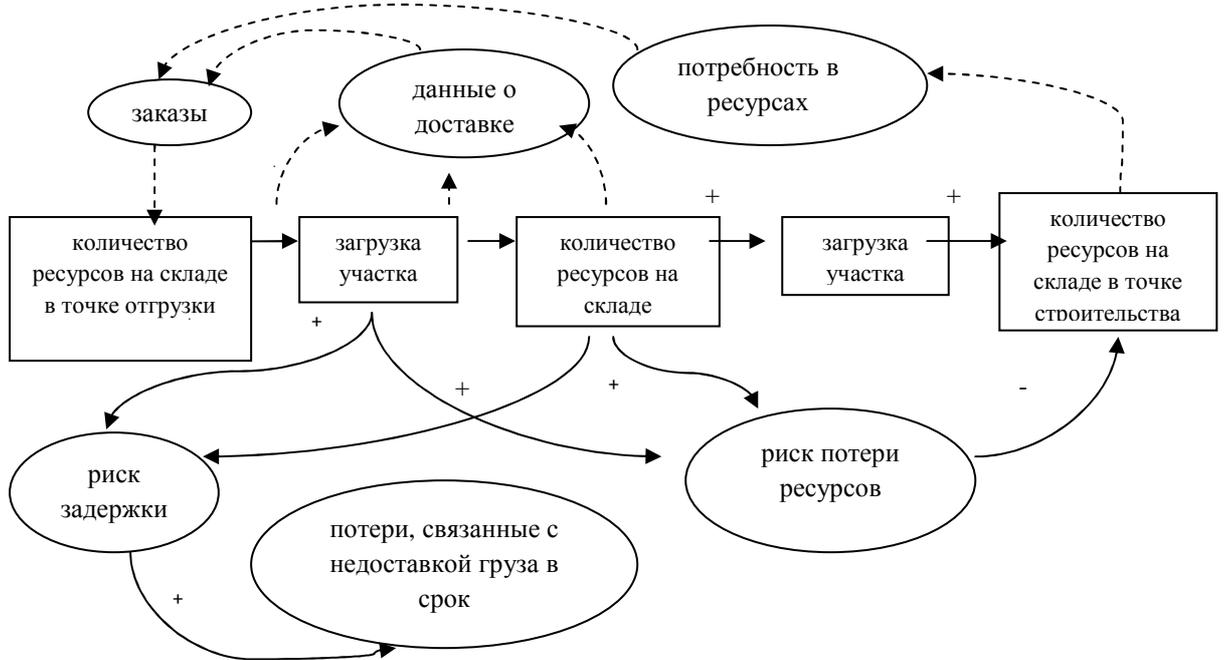


Рисунок 3.6 - Механизм возникновения обратных связей в системе транспортировки.

В процессе строительства могут возникать непредусмотренные проектом дополнительные потребности в ресурсах, которые вместе с потерями на участках перевозки определяют дополнительные заказы ресурсов, которые в свою очередь дают дополнительную нагрузку на все участки перевозки. Дополнительная загрузка участков перевозки (особенно непредусмотренная решением оптимизационной задачи) влечет дополнительные потери и затраты. Таким образом, мы наблюдаем обратные связи в системе: между количеством ресурсов на участках, потерями и темпами отправки.

Модель системной динамики формально представляет собой систему рекуррентных уравнений, отражающих изменение системы во времени. Эти уравнения отражают взаимосвязи между динамическими переменными системы, а также воздействие на них случайных параметров. Простейшая система транспортировки представлена на рисунке 3.7. Достаточно описать уравнения для промежуточных участков перевозки, для начального и конечного участков, а также различия в расчете переменных для разных типов транспорта. Используя эти уравнения их можно масштабировать для транспортной системы любого размера.

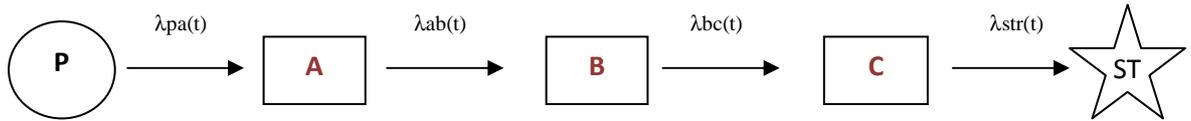


Рисунок 3.7 - Потoki ресурсов между точками маршрута, простая транспортная сеть.

В качестве исходных данных имитационной модели выступают: решение оптимизационной задачи, параметры участков перевозки, взятые по усредненным проектным данным (тарифы, пропускные способности и пр.), вероятностные характеристики случайных событий (потерь, задержек и пр.). Рассмотрим уравнения системной динамики для модели без учета случайных факторов. Взаимосвязь между уровнями и темпами такой имитационной модели отражена на рисунке 3.8. Переменные, взятые исходя из решения оптимизационной задачи и проектных данных будем называть нормативными, обозначать штрихом, т.к. впоследствии под влиянием случайных факторов они будут изменяться. Переменными модели являются:

$A'(t), B'(t), C'(t)$ – нормативное количество грузов на хранении в момент t (по результатам решения оптимизационной задачи).

$A_{max}'(t), B_{max}'(t), C_{max}'(t)$ – максимальный объем принимаемого груза в точках перевалки (по усредненным проектным данным).

$\lambda_{ab}'(t), \lambda_{ab}^{*'}(t), \lambda_{bc}'(t), \lambda_{bc}^{*'}(t)$ – нормативные интенсивности отправки и приема грузов по участкам в зависимости от времени.

$\lambda_p'(t), \lambda_{pmax}'(t)$ - нормативная и максимальная интенсивности поставки ресурсов от изготовителя соответственно;

$\lambda_{st}'(t)$ – нормативная интенсивность поставки ресурсов на объект строительства;

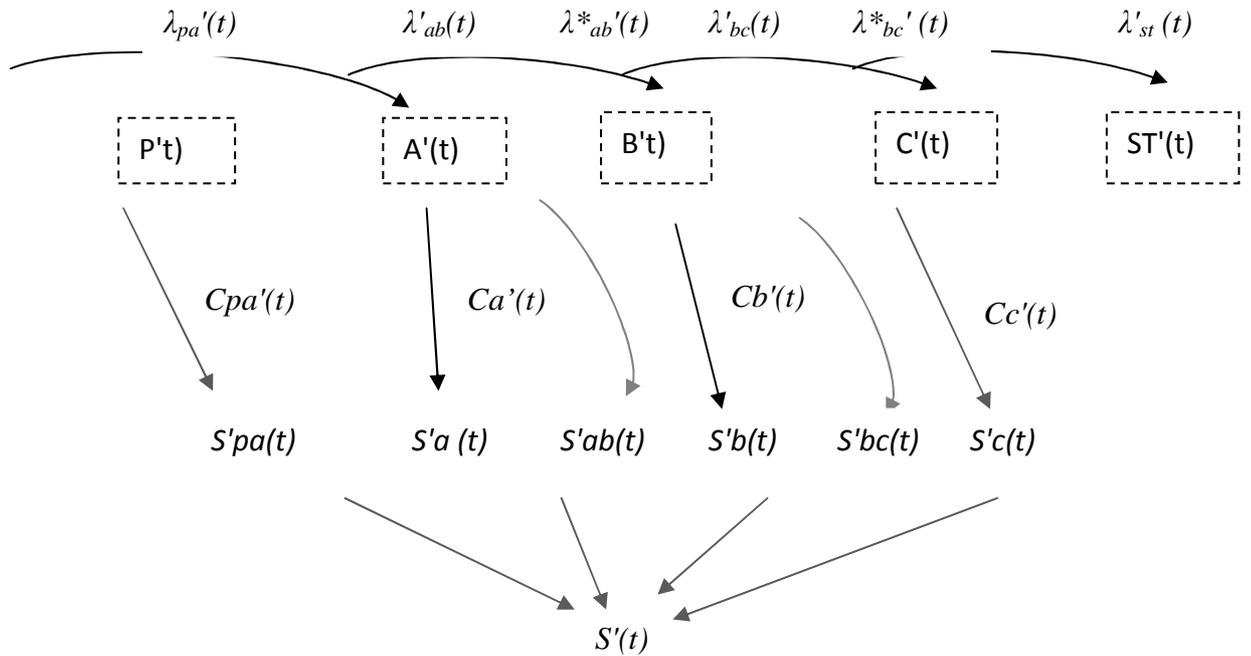


Рисунок 3.8 - Взаимодействие переменных имитационной модели без учета случайных факторов.

Интенсивности перевозки и отправки ресурсов определяются решением оптимизационной задачи. Оптимизационная задача решается для больших интервалов времени, чем единица модельного времени имитационной модели. Считая от отправку ресурсов равномерной, интенсивности отправки вычисляем исходя из используемой единицы модельного времени. Так, например, из решения оптимизационной задачи X_{ij} , соответствующее участку перевозки АВ, получим $\lambda'_{ab}(t)$ следующим образом: $\lambda'_{ab}(t) = X_{ij} / \Delta t$ (3.1)

где Δt – количество интервалов модельного времени в интервале, учитываемом в оптимизационной задаче, или отношение этих интервалов. Например, в рассматриваемом случае оптимизационная задача решается для интервала 1 месяц, интервал модельного времени для имитационной модели- 1 день, тогда $\Delta t = 30$.

Δt_{ab} , Δt_{bc} – нормативные длительности перевозки грузов по участкам АВ и ВС соответственно;

$S_{ab}(t)$, $S_{bc}(t)$ – нормативная стоимость перевозки по участкам АВ и ВС соответственно;

$S_a'(t), S_b'(t), S_c'(t)$ - нормативная стоимость хранения в точках А, В и С соответственно;

$S_p'(t)$ – нормативная стоимость поставки ресурсов;

$C_a'(t), C_b'(t), C_c'(t)$ – нормативный тариф на хранение в точках А, В и С соответственно;

$P_{ab}'(t), P_{bc}'(t)$ – нормативная пропускная способность участков перевозки АВ и ВС соответственно;

$P_a'(t), P_b'(t), P_c'(t)$ – нормативная вместимость точек хранения А, В и С соответственно;

$P'(t)$ – количество ресурсов в точке поставщика;

$C'(t)$ – цена поставки единицы ресурса;

$ST'(t)$ – количество ресурсов в конечной точке;

$C_{ab}'(t), C_{bc}'(t)$ – нормативные тарифы на доставку по участкам АВ и ВС соответственно, включают в себя:

$C_{ab}^{per}(t), C_{bc}^{per}(t)$ – стоимость перевозки на участках АВ и ВС соответственно;

$C_{ab}^p(t), C_{bc}^p(t)$ – тариф на погрузочные работ в точках А и В соответственно;

$C_{ab}^r(t), C_{bc}^r(t)$ – тариф на разгрузочные работы в точках В и С соответственно;

P_0 - начальное количество ресурсов на складе поставщика (зададим общий требуемый объем отправки);

$S'(t)$ – суммарная стоимость перевозки по участкам;

В начальный момент времени производится расчет уровней и темпов с учетом начальных параметров системы, затем системное время увеличивается на 1 и информация о настоящем моменте времени становится относящейся к предыдущему моменту. Вычисления проводятся до тех пор, пока системное время не достигнет заданной величины в зависимости от потребностей аналитика (срок планируемых поставок и т.п.). Процесс вычисления представляет собой численное интегрирование (последовательное накопление) значений. При

отсутствии влияния случайных величин и их взаимодействия для всех точек выполнялись бы следующие соотношения:

Начальные значения уровней:

В начальный момент модельного времени количество грузов в промежуточных и конечных точках, а также на участках перевозки равно нулю:

$$A'(0) = B'(0) = C'(0) = ST'(0) = 0, \quad (3.2)$$

где $P'(0) = P_0$ (в начальной точке объем груза определяется общим объемом отправляемых ресурсов);

$$S_{ab}'(0), S_{bc}'(0), S_{st}'(0), S_a'(0), S_p'(0), S_b'(0), S_c'(0), S'(t) = 0. \quad (3.3)$$

Уравнения изменения уровней:

$$P'(t+\Delta t) = P'(t) - \lambda_p'(t) \Delta t, \quad (3.4)$$

$$A'(t+\Delta t) = A'(t) + (\lambda_p'(t) - \lambda_{ab}'(t)) \Delta t, \quad (3.5)$$

$$B'(t+\Delta t) = B'(t) + (\lambda_{ab}^*(t) - \lambda_{bc}'(t)) \Delta t, \quad (3.6)$$

$$C'(t+\Delta t) = C'(t) + (\lambda_{bc}^*(t) - \lambda_{st}'(t)) \Delta t, \quad (3.7)$$

$$ST'(t+\Delta t) = ST'(t) + \lambda_{st}'(t) \Delta t, \quad (3.8)$$

$$\lambda_{ab}^*(t) = \text{delay}(\lambda_{ab}'(t); \Delta t_{ab}'), \quad (3.9)$$

$$\lambda_{bc}^*(t) = \text{delay}(\lambda_{bc}'(t); \Delta t_{bc}'). \quad (3.10)$$

Большинство программных средств имитационного моделирования позволяют реализовать функцию задержки сигнала (или темпа). Обозначается такая функция по-разному, в зависимости от конкретного программного продукта. Например, в используемом в данной работе, продукте Anylogic есть функция $\text{delay}(x, \Delta t)$, которая на выходе дает сигнал x , задерживаемый на время Δt . Приведенный на рисунке 3.9 график иллюстрирует работу функции задержки:

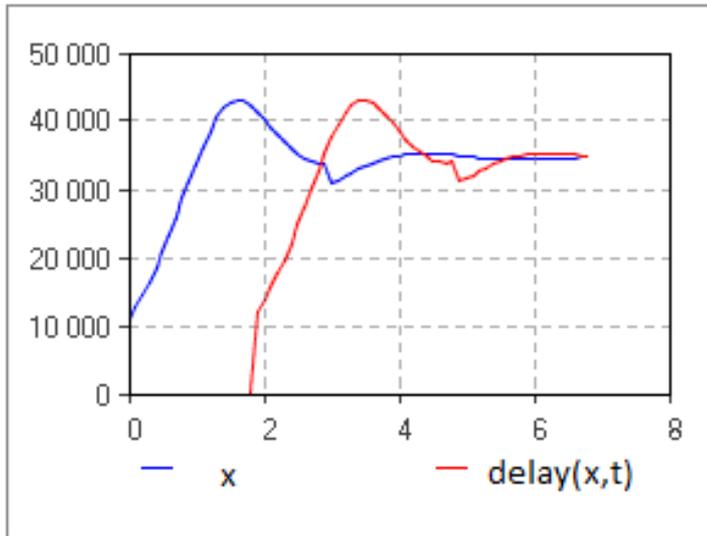


Рисунок 3.9 - Функция задержки сигнала в имитационных моделях.

Для реализации в модели материальных потоков используется также функция `delayMaterial`, которая возвращает значение входа, задержанное на заданное время задержки. Отличие ее от функции `delay` в том, что при уменьшении времени задержки некоторые значения входа будут добавляться к наиболее новым значениям выхода. При увеличении времени задержки в течение времени, при котором будет отсутствовать выход, будет использоваться значение `missingValue` – указываемое как аргумент функции. Эта функция полезна при моделировании очередей и производственных процессов с переменными и часто случайными временами обслуживания/обработки [92].

В соответствии с физическим перемещением грузов, увеличивается сумма затраченных средств:

$$S'(t) = S_p'(t) + S_{ab}'(t) + S_{bc}'(t) + S_a'(t) + S_b'(t) + S_c'(t), \quad (3.11)$$

$$S_{pa}'(t + \Delta t) = S_p'(t) + \lambda_p'(t) C'(t) \Delta t, \quad (3.12)$$

$$S_{ab}'(t + \Delta t) = S_{ab}'(t) + \lambda_{ab}'(t) \Delta t C_{ab}'(t), \quad (3.13)$$

$$S_{bc}'(t + \Delta t) = S_{ab}'(t) + \lambda_{bc}'(t) \Delta t C_{bc}'(t), \quad (3.14)$$

$$C_{ab}'(t) = C_{ab}^{per}'(t) + C_{ab}^p'(t) + C_{ab}^r'(t), \quad (3.15)$$

$$C_{bc}'(t) = C_{bc}^{per}'(t) + C_{bc}^p'(t) + C_{bc}^r'(t). \quad (3.16)$$

С каждым единичным приращением модельного времени происходит изменение количества груза, находящегося в каждой точке на хранении и соответственно накопление стоимости хранения:

$$S_a'(t+\Delta t) = S_a'(t) + C_a'(t)A(t)\Delta t, \quad (3.17)$$

$$S_b'(t+\Delta t) = S_b'(t) + C_b'(t)B(t)\Delta t, \quad (3.18)$$

$$S_c'(t+\Delta t) = S_c'(t) + C_c'(t)C(t)\Delta t. \quad (3.19)$$

Рассмотрим построение имитационной модели с учетом ограничений задачи и вероятностных факторов в системе транспортировки. Источники появления случайных факторов могут быть внешними (природные факторы) и внутренними (аварии, поломки и пр.) Для моделирования таких факторов необходимо знать (или предполагать) закон распределения соответствующих случайных величин (заданный теоретически или эмпирически). При этом необходимо использовать генераторы псевдослучайных чисел для имитации случайности тех или иных событий.

Для реализации имитационной модели, приближенной к реальному процессу, доставки необходимо учитывать следующие факторы:

1. Задержки груза на участках перевозки в следствие:

- поломок и аварий на транспорте;
- изначально усредненных проектных данным касательно: скорости движения, типа автодорог, их загруженности и др.

Учитывая указанные факторы, их большое количество и разную природу, предлагается время доставки ресурса по участку представлять нормально распределенной случайной величиной, с математическим ожиданием $\Delta t'$ и среднеквадратическим отклонением исходя из экспертных данных.

Известно, что нормальное распределение возникает в тех случаях, когда складывается большое количество независимых (или слабозависимых) случайных величин, причем эти величины сравнимы по порядку своего влияния на рассеивание суммы. Часто встречающиеся на практике случайные величины образуются именно в результате суммирования многих случайных слагаемых. В

частности, в очень многих случаях практики ошибки измерения распределяются по закону, близкому к нормальному.

2. Изменение стоимости перевозки и хранения:

Поскольку тарифы перевозки, погрузочно-разгрузочные работы и хранение по проектным данным принимаются усредненными, их значения могут колебаться в зависимости от:

- типа груза,
- различной загрузки транспортных средств,
- различных перевозчиков,
- неучтенных операций,
- первоначально неточного измерения тарифов,

Тарифы перевозки и хранения аналогично времени доставки принимаются нормально распределенными случайными величинами.

Кроме того, за счет более поздней отправки грузов в связи с потерями, применяются соответственно более высокие (в связи с инфляцией) тарифы.

3. Потери грузов на участках перевозки и хранения в следствие:

- повреждений упаковки и самих ресурсов в случае несоблюдения правил доставки, хранения, погрузочно-разгрузочных работ.

- аварий и поломок на транспорте;
- форс-мажорных обстоятельств;

Перечисленные факторы независимы друг от друга и порождают потоки случайных событий, приводящих к потерям ресурсов, и, следовательно, определяют количество потерь в процессе транспортировки и хранения ресурсов. Известно, что [20] пуассоновское распределение случайной величины определяет число событий произошедших за фиксированное время, при условии, что данные события происходят с некоторой фиксированной средней интенсивностью и независимо друг от друга. Кроме того, пуассоновское распределение случайной величины является предельным для биномиального, когда число опытов велико, а вероятность события очень мала, т.е. в каждом отдельном опыте событие появляется крайне редко. Отсюда происходит применяющееся иногда для закона

Пуассона название «закон редких явлений». С учетом того, перечисленные факторы потерь на транспорте на самом деле встречаются редко, а также учитывая, что потери на участках перевозки порождаются такими случайными событиями и складываются из большого количества разнородных независимых факторов, количество потерь будем описывать случайной величиной с пуассоновским законом распределения и математическим ожиданием, отражающим средний процент потерь ресурсов при транспортировке в единицу времени. Оно определяется некоторыми статистическими данными о потерях на различных участках перевозки в зависимости от вида транспорта либо экспертными оценками.

Тогда, с учетом того что количество случайных событий, ведущих к потерям пропорционально времени доставки Δt , интенсивность потерь должна быть пропорциональна этим двум параметрам - числу отправленных ресурсов $\lambda(t)$ и времени задержки (перевозки) Δt (рисунок 3.10). Математическое ожидание процента потерь задается лицом, принимающим решения, различной по видам транспорта.

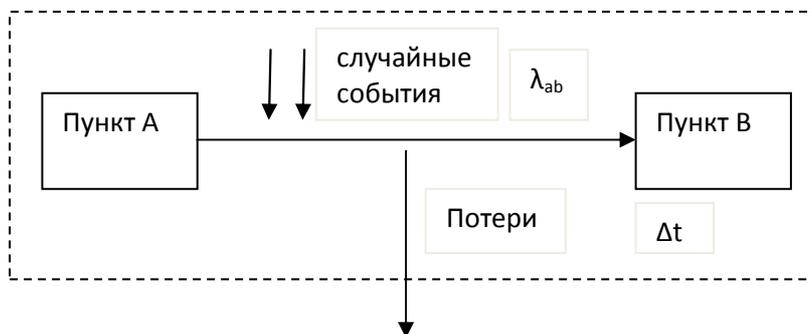


Рисунок 3.10 - Интенсивность потерь ресурсов в результате потока случайных событий в процессе транспортировки.

Отдельно задаются средние значения процента потерь ресурсов при перевозке, при производстве погрузочно-разгрузочных работ, и при хранении. Количество потерь при погрузке-разгрузке также задано пуассоновским потоком с математическим ожиданием, определяющим процент потерь от всего приходящего груза.

Потери при хранении определяются аналогично – задается средний процент потерь относительно всего хранимого груза в единицу времени. Общие потери могут быть отражены так же - пуассоновским законом распределения.

4. Изменение пропускной способности участков перевозки и точек хранения грузов вследствие неточных и усредненных проектных данных. Факторами изменения могут быть: другие грузоотправители, количество доступных транспортных средств или подвижного состава, количество доступных погрузо-разгрузочных механизмов и площадок, и т.п.

Так как пропускная способность – величина, ограниченная сверху и снизу, представить ее можно аналогично ограниченной случайной величиной. Например, в используемом в работе Anylogic, такими свойствами обладают непрерывные распределения: перт, треугольное triangular, или beta распределение [92]. В каждом из случаев необходимо задать минимальное и максимальное значения, а также наиболее вероятное значение (для перт и треугольного распределений), которым в нашем случае может служить проектное значение параметра, либо дополнительные параметры в случае с beta распределением.

5. Некоторые участки перевозки работают круглый год, другие – сезонно. Начало и окончание работы сезонных участков определяется погодой в регионе (замерз автозимник, растаял лед для мореплавания) Исходные проектные данные касательно начала и окончания работы таких участков - усредненные и могут не отражать реальные данные. Поскольку погодные условия складываются из совокупности различных факторов, времена начала и окончания работы таких участков перевозки – также случайные величины, ограниченные сверху и снизу, поэтому закон распределения можно принять аналогично изменениям пропускной способности.

6. В пункте потребления может происходить изменение потребности в ресурсах вследствие различных факторов, тогда объем требуемых ресурсов также может быть случайной величиной с характеристиками в зависимости от конкретного проекта.

Исходя из общих потерь, задержек, изменения темпов потребления ресурсов (плана строительства), и, вследствие этого, дополнительных заказов ресурсов, динамика рассматриваемой системы меняется. Задержки отправки ресурсов по участкам могут быть вызваны меньшей пропускной способностью чем проектная, невозможностью принять транспортное средство в конечной точке участка из-за ее загруженности. Возникающие обратные связи отражены на Рисунке 3.6. Дополнительный объем отправляемых ресурсов дает дополнительную нагрузку на участки перевозки, что может привести к затруднениям на этих маршрутах, которые, в свою очередь, могут способствовать задержкам и дополнительным потерям.

Кроме нормативных переменных, описанных выше введем следующие:

$A(t), B(t), C(t)$ – количество грузов на хранении в момент t .

$A_{\max}(t), B_{\max}(t), C_{\max}(t)$ – максимальный объем принимаемого груза в точках перевалки.

$\lambda_{ab}(t), \lambda^*_{ab}(t), \lambda_{bc}(t), \lambda^*_{bc}(t)$ – интенсивность отправки и приема грузов по участкам в зависимости от времени.

$\lambda_p(t)$ - интенсивность поставки ресурсов от изготовителя;

$\lambda_{st}(t)$ – интенсивность поставки ресурсов на объект строительства;

$\Delta t_{ab}, \Delta t_{bc}$ – длительности перевозки грузов по участкам АВ и ВС соответственно;

$S_{ab}(t), S_{bc}(t)$ – стоимость перевозки по участкам АВ и ВС соответственно;

$S_a(t), S_b(t), S_c(t)$ - стоимость хранения в точках А, В и С соответственно;

$S_{pa}(t)$ – стоимость поставки ресурсов;

$C_a(t), C_b(t), C_c(t)$ – тариф на хранение в точках А, В и С соответственно;

$P_{ab}(t), P_{bc}(t)$ – пропускная способность участков перевозки АВ и ВС соответственно;

$P_a(t), P_b(t), P_c(t)$ – вместимость точек хранения А, В и С соответственно;

$P(t)$ – количество ресурсов в точке поставщика;

$C(t)$ – цена поставки единицы ресурса;

$ST(t)$ – количество ресурсов в конечной точке;

$C_{ab}(t), C_{bc}(t)$ – тарифы на доставку по участкам АВ и ВС соответственно, включают в себя:

$C_{ab}^{per}(t), C_{bc}^{per}(t)$ – стоимость перевозки на участках АВ и ВС соответственно;

$C_{ab}^p(t), C_{bc}^p(t)$ – тариф на погрузочные работ в точках А и В соответственно;

$C_{ab}^r(t), C_{bc}^r(t)$ – тариф на разгрузочные работы в точках В и С соответственно;

$Pot_a(t), Pot_b(t), Pot_c(t)$ – потери ресурсов в точках А, В и С соответственно;

$Pot_{ab}(t), Pot_{bc}(t)$ – потери ресурсов на участках АВ и ВС соответственно;

$\lambda_{pot_a}(t), \lambda_{pot_b}(t), \lambda_{pot_c}(t), \lambda_{pot_{ab}}(t), \lambda_{pot_{bc}}(t)$ – интенсивности потоков потерь в точках А, В, С и на участках АВ и ВС соответственно;

$Pot(t)$ – общие потери;

$\lambda_{pot}(t)$ – интенсивность общих потерь;

Δt_{zak} - минимальное время обработки заказа поставщиком (время между потребностью и сроком поставки);

$Spot(t)$ – общая сумма потерь;

$Shtr(t)$ – итоговый штраф за недоставку ресурсов в точку строительства;

C_{spot} – затраты при потере единицы ресурса;

$C_{shtr}(t)$ – штраф за недоставку единицы ресурса в конечную точку в единице времени;

Начальные значения уровней:

В начальный момент модельного времени количество грузов в промежуточных и конечных точках, а также на участках перевозки равно нулю:

$$A(0)=B(0)=C(0)=ST(0)=0, \quad (3.20)$$

$$P(0) = P_0 \quad (3.21)$$

(в начальной точке объем груза определяется общим объемом отправляемых ресурсов);

$$S_{ab}(0), S_{bc}(0), S_{st}(0), S_a(0), S_{pa}(0), S_b(0), S_c(0), S(t), Spot(t), Shtr(t) = 0, \quad (3.22)$$

$$Pot_a(0), Pot_b(0), Pot_c(0), Pot_{ab}(0), Pot_{bc}(0)=0. \quad (3.23)$$

Модельные тарифы перевозки, пропускные способности участков перевозки, время доставки по участкам и максимальная загрузка баз хранения будут отличаться от нормативных с учетом случайных воздействий. На рисунке 3.11 отражено движение товарных и информационных потоков на участке перевозки, однако не отражены переменные, связанные с итоговой стоимостью перевозки, дополнительными затратами на приобретение ресурсов, затраты, связанные с задержкой строительства. Они отражены в уравнениях состояния системы. Штриховыми стрелками на рисунке отображены информационные связи.

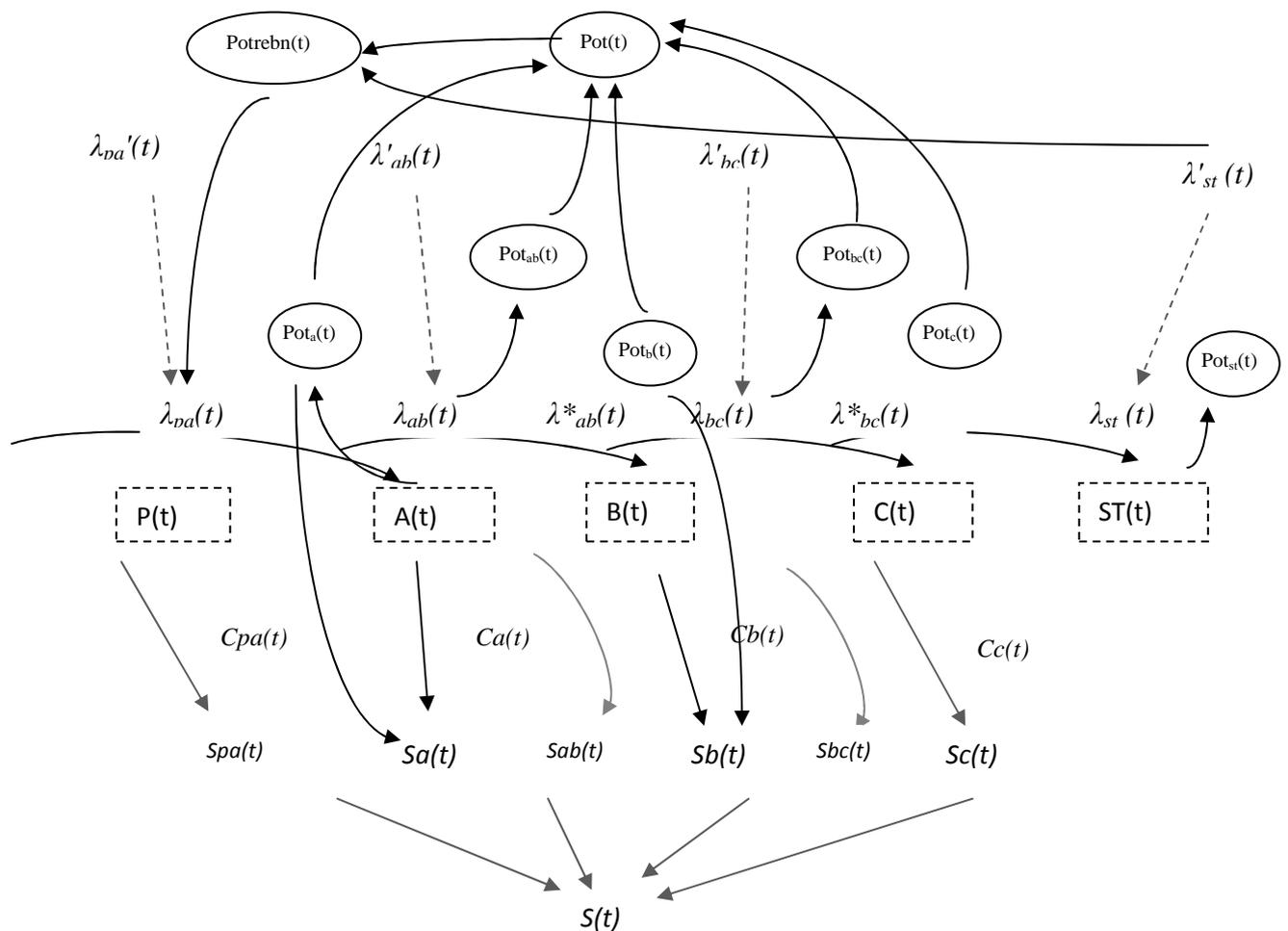


Рисунок 3.11 - Взаимодействие переменных имитационной модели с учетом воздействия случайных факторов.

Переменные Δt_{ab} и Δt_{bc} изначально являются функциями времени, так как могут определяться, например, сезонностью и связанным с ней состоянием дорог. Кроме того, в моделируемой системе эти параметры будут отличаться от нормативных сроков – будут представлены случайными величинами.

Отклонения по скорости доставки, количеству потерь, стоимости и пропускной способности будут различны по видам транспорта, например, железнодорожный транспорт менее зависим от природных факторов, в то время как авто и речной, особенно в северных районах, сильно привязаны к погоде: автозимник работает только зимой, в то время как морской путь зимой может оказаться недоступен.

В случае с зимней автодорогой, или северными морскими путями пропускная способность $P_{ab}(t)$ – дискретная функция, автодорога и навигация либо работает, либо нет в зависимости от сроков наступления холодов. В таком случае $P_{ab}(t)$ является еще и функцией случайной переменной, которая определяет начало и окончание работы участка перевозки, она принимает значения 0 или 1.

В Anylogic, например, для реализации таких переменных используется функция единичного импульса $\text{pulse}(\text{startTime}, \text{pulseWidth})$, входными параметрами которой являются время начала импульса и длительность импульса во времени. Начиная с момента startTime , в течение временного интервала pulseWidth возвращает 1; в остальное время возвращает 0, график работы функции приведен на рисунке 3.12. Эти параметры определяются реальными данными о начале работы участка перевозки и продолжительности работы. При этом входные параметры в соответствии с вероятностным характером реальности представляют собой случайные величины, ограниченные сверху и снизу (например треугольное распределение).

Тогда если пропускные способности $P_{ab}(t)$ и $P_{bc}(t)$ – случайные величины с заданным законом распределения и математическими ожиданиями $P'_{ab}(t)$ и $P'_{bc}(t)$ соответственно, для описанных участков с ограниченным периодом работы они будут описываться как:

$$P^*(t) = \text{pulse}(\text{startTime}, \text{pulse Width}) P(t). \quad (3.24)$$

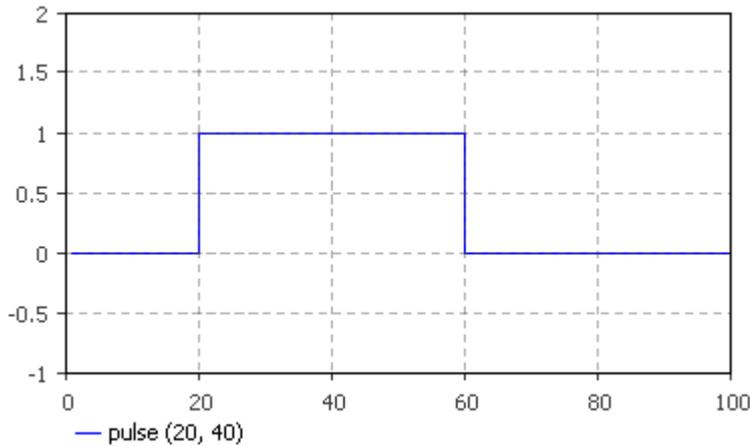


Рисунок 3.12 - График функции $\text{pulse}(\text{startTime}, \text{pulseWidth})$ в Anylogic.

Тарифы на железнодорожные перевозки в большей степени регулируются государством, чем авто и морские, а значит могут быть приняты как параметр задачи с большей степенью достоверности (с меньшими отклонениями случайной величины при имитационном моделировании).

С учетом таких изменений исходных данных – параметров задачи процесс транспортировки должен идти согласно другим правилам: в точках накапливается избыток ресурсов, можно ли их отправить дальше? Для этого нужно проверить текущую загрузку точки приема грузов, участка перевозки. С учетом потерь необходимо инициировать дополнительную отправку ресурсов и начальной точки и дальнейшее ее передвижение по маршруту. Тогда уравнения изменения уровней изменятся. Общая схема формирования дополнительных отправок представлена на рисунке 3.13.

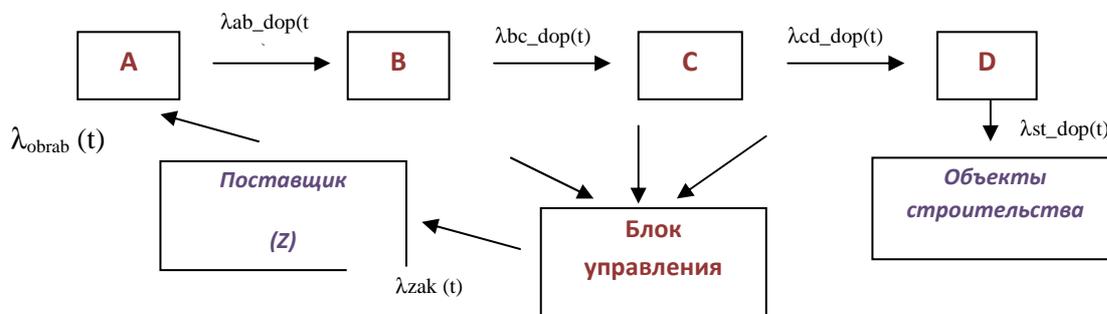


Рисунок 3.13 - Схема формирования дополнительных заказов ресурсов.

Таким образом, для нашего примера состояние системы в любой момент времени может быть описано с помощью следующих выражений:

Уравнения изменения уровней:

$$P(t+\Delta t) = P(t) - \lambda_p(t) \Delta t, \quad (3.25)$$

$$A(t+\Delta t) = A(t) + (\lambda_p(t) - \lambda_{ab}(t) - \lambda_{pot_a}(t)) \Delta t, \quad (3.26)$$

$$B(t+\Delta t) = B(t) + (\lambda_{ab}^*(t) - \lambda_{bc}(t) - \lambda_{pot_b}(t)) \Delta t, \quad (3.27)$$

$$C(t+\Delta t) = C(t) + (\lambda_{bc}^*(t) - \lambda_{st}(t) - \lambda_{pot_c}(t)) \Delta t, \quad (3.28)$$

$$ST(t+\Delta t) = ST(t) + \lambda_{st}(t) \Delta t. \quad (3.29)$$

Интенсивности отправки и приема с учетом потерь и задержек $\lambda_{ab}(t)$ и $\lambda_{ab}^*(t)$ будут отличаться друг от друга, тогда:

$$\lambda_{ab}^*(t) = \text{delayMaterial}((\lambda_{ab}(t) - \lambda_{pot_{ab}}(t)); \Delta t_{ab}), \quad (3.30)$$

$$\lambda_{bc}^*(t) = \text{delayMaterial}((\lambda_{bc}(t) - \lambda_{pot_{bc}}(t)); \Delta t_{bc}), \quad (3.31)$$

где Δt_{ab} , и Δt_{bc} – нормально распределенные случайные величины с математическим ожиданием Δt_{ab} и Δt_{bc} соответственно, а $\lambda_{pot_{ab}}(t)$ и $\lambda_{pot_{bc}}(t)$ складываются из потерь при перевозке и производстве погрузочно-разгрузочных работ, которые представлены случайными величинами с пуассоновским законом распределения, математическое ожидание которых пропорционально λ_{ab} , λ_{bc} , Δt_{ab} , Δt_{bc} .

Уравнения накопления затрат:

$$S(t) = Spa(t) + S_{ab}(t) + S_{bc}(t) + S_a(t) + S_b(t) + S_c(t) + S_{pot}(t) + Shtr(t), \quad (3.32)$$

$$S_p(t+\Delta t) = S_p(t) + \lambda_p(t)C(t) \Delta t, \quad (3.33)$$

$$S_{ab}(t+\Delta t) = S_{ab}(t) + \lambda_{ab}(t) \Delta t C_{ab}(t), \quad (3.34)$$

$$S_{bc}(t+\Delta t) = S_{bc}(t) + \lambda_{bc}(t) \Delta t C_{bc}(t), \quad (3.35)$$

$$S_a(t+\Delta t) = S_a(t) + C_a(t)A(t)\Delta t, \quad (3.36)$$

$$S_b(t+\Delta t) = S_b(t) + C_b(t)B(t)\Delta t, \quad (3.37)$$

$$S_c(t+\Delta t) = S_c(t) + C_c(t)C(t) \Delta t, \quad (3.38)$$

$$C_{ab}(t) = C_{ab}^{per}(t) + C_{ab}^p(t) + C_{ab}^r(t), \quad (3.39)$$

$$C_{bc}(t) = C_{bc}^{per}(t) + C_{bc}^p(t) + C_{bc}^r(t). \quad (3.40)$$

Все значения тарифов $C_a(t)$, $C_b(t)$, $C_c(t)$, $C_{ab}^p(t)$, $C_{bc}^p(t)$, $C_{ab}^r(t)$, $C_{bc}^r(t)$, $C_{ab}^{per}(t)$,

$C_{bc}^{per}(t)$ являются нормально распределенными случайными величинами.

$$Spot(t+\Delta t) = Spot(t) + ((\lambda_{pot_a}(t) + \lambda_{pot_b}(t) + \lambda_{pot_c}(t) + \lambda_{pot_{ab}}(t) + \lambda_{pot_{bc}}(t) + \lambda_{pot_{dopab}}(t) + \lambda_{pot_{dopbc}}(t))C_{pot})\Delta t, \quad (3.41)$$

где $\lambda_{pot_{dopab}}(t)$ и $\lambda_{pot_{dopbc}}(t)$ – интенсивности потерь дополнительных отправок ресурсов, о которых будет сказано ниже.

Разница в количестве доставленных ресурсов на объект строительства и в плановой потребности, в отчетные периоды времени определяет задержку строительства. Штраф за задержку будем вычислять как

$$Shtr(t+\Delta t) = Shtr(t) + (ST'(t) - ST(t))C_{shtr}(t)\Delta t, \quad (3.42)$$

где $Shtr(t)$ - затраты, возникающие при недостатке груза в пункте потребления. $ST(t)$ пропорционально части построенного объекта, недостача ресурсов определяет временные задержки, $C_{shtr}(t)$ – отражает штраф за задержку единицы ресурса.

$$Pot_{ab}(t+\Delta t) = Pot_{ab}(t) + (\lambda_{pot_{ab}}(t) + \lambda_{pot_{dopab}}(t))\Delta t, \quad (3.43)$$

$$Pot_{bc}(t+\Delta t) = Pot_{bc}(t) + (\lambda_{pot_{bc}}(t) + \lambda_{pot_{dopbc}}(t))\Delta t, \quad (3.44)$$

$$\lambda_{pot}(t) = \lambda_{pot_{ab}}(t) + \lambda_{pot_{bc}}(t) + \lambda_{pot_a}(t) + \lambda_{pot_b}(t) + \lambda_{pot_c}(t) + \lambda_{pot_{dopab}}(t) + \lambda_{pot_{dopbc}}(t), \quad (3.45)$$

$$Pot(t+\Delta t) = Pot(t) + \lambda_{pot}(t)\Delta t. \quad (3.46)$$

Количество ресурсов поступающих на объект строительства $\lambda_{st}(t)$ определяется потребностью в ресурсах на конечном участке в момент времени t . $ST(t)$ - количество ресурсов, которое поступает на объект строительства к моменту времени t . Если часть ресурсов не прибыла в точку строительства вовремя, при появлении на приобъектном складе, их следует как можно скорее доставить на стройку:

$$\lambda_{st}(t) = \min(C(t); (\lambda_{st}'(t) + ST'(t) - ST(t))). \quad (3.47)$$

При решении оптимизационной задачи мы получаем в частности общий объем отправленных грузов P_0 , который может превышать объем требуемых ресурсов на площадке строительства на величину ΔP , в которой заранее учтены возможные потери.

На каждом этапе модельного времени $Pot(t)$ сравнивается с ΔP : если $Pot(t) > \Delta P$, в реальной ситуации, в таком случае необходимо как можно скорее организовать дополнительную поставку ресурсов. В рассматриваемом примере есть лишь один маршрут перевозки, поэтому все дополнительные ресурсы отправляются на точку P и следуют далее.

Обозначим $\lambda_{zak}(t)$ – интенсивность потока заказов продукции,

$$\lambda_{zak}(t) = \begin{cases} \lambda_{pot}(t), & \text{если } Pot(t) > \Delta P \\ 0, & \text{если } Pot(t) < \Delta P \end{cases} \quad (3.48)$$

Пусть $S_z(t)$ – объем заказанной, и еще не поставленной продукции, тогда

$$S_z(t+\Delta t) = S_z(t) + (\lambda_{zak}(t) - \lambda_{dop}(t)) \Delta t, \quad (3.49)$$

где $\lambda_{dop}(t)$ – интенсивность дополнительной поставки грузов;

$$\lambda_{dop}(t) = delay(\lambda_{zak}(t); \tau_z(t)), \quad (3.50)$$

где $\tau_z(t)$ – срок обработки заказов на выпуск/покупку недостающих ресурсов (определяется скоростью выпуска продукции/наличием на складах/производственными мощностями поставщика). Этот срок является случайной величиной с математическим ожиданием, зависящим от времени $\tau'_z(t)$, так как может зависеть от загрузки производства в данный период времени, от сезона поставки и др. $\tau'_z(t)$ – нормативное время обработки заказа.

$$Dop(t+\Delta t) = Dop(t) + (\lambda_{dop}(t) - \lambda_{dop_{pa}}(t)) \Delta t. \quad (3.51)$$

Уравнение (3.51) определяет количество грузов, готовых для дополнительной поставки. Таким образом в точку A отправляется еще один поток ресурсов $\lambda_{dop}(t)$.

Тогда будем учитывать отдельно потоки дополнительных ресурсов как $\lambda_{dop_{pa}}(t), \lambda_{dop_{ab}}(t), \lambda_{dop_{bc}}(t)$;

И вычислять соответствующие уровни накопления дополнительных ресурсов в промежуточных точках: $Adop(t), Bdop(t), Cdop(t)$.

$$\text{В начальный момент времени } Adop(0), Bdop(0), Cdop(0) = 0. \quad (3.52)$$

Уравнения для уровней:

$$Adop(t+\Delta t) = Adop(t) + (\lambda_{dop}(t) - \lambda_{dop_{ab}}(t) - \lambda_{pot_{dopa}}(t)) \Delta t, \quad (3.53)$$

$$Bdop(t+\Delta t) = Bdop(t) + (\lambda * dop_{ab}(t) - \lambda dop_{bc}(t) - \lambda pot_{dopb}) * \Delta t, \quad (3.54)$$

$$Cdop(t+\Delta t) = Cdop(t) + (\lambda * dop_{bc}(t) - \lambda st(t) - \lambda pot_{dopc}) * \Delta t. \quad (3.55)$$

Тогда интенсивность поставки в точку А:

$$\lambda_p(t) = \min(\lambda_p'(t) + \lambda dop(t); A_{ost}(t)), \quad (3.56)$$

где $A_{ost}(t)$ – возможности для принятия ресурсов в точке А в момент времени t .

При этом из точки А далее исходящий поток также изменится. Однако для того чтобы отправить дополнительные ресурсы необходимо проверить загрузку точки (возможность приема грузов). Аналогично и для всех остальных точек – увеличенная поставка происходит только после проверки. Кроме того необходимо проверять пропускную способность участка. Для каждой точки определим свободное место для размещения и переработки грузов в определенный момент времени:

$$A_{ost}(t) = P_a(t) - A(t), \quad (3.57)$$

$$B_{ost}(t) = P_b(t) - B(t), \quad (3.58)$$

$$C_{ost}(t) = P_c(t) - C(t), \quad (3.59)$$

где $P_a(t)$, $P_b(t)$, $P_c(t)$ – случайные величины, ограниченные сверху и снизу с заданным законом распределения (например, треугольным). Эти параметры зависят от погоды, других грузоотправителей, непредвиденных обстоятельств.

$$\lambda_{ab}(t) = \min((\lambda_{ab}'(t) + Adop(t)); P_{ab}(t); Bost(t)), \quad (3.60)$$

$$\lambda_{bc}(t) = \min((\lambda_{bc}'(t) + Bdop(t)); P_{bc}(t); Cost(t)). \quad (3.61)$$

Уравнения (3.60, 3.61) учитывают возможность отправки большего количества груза, который задержался или дополнительно поступил на точку, где

$$\lambda dop_{ab}(t) = \lambda_{ab}(t) - \lambda_{ab}'(t), \quad (3.62)$$

$$\lambda dop_{bc}(t) = \lambda_{bc}(t) - \lambda_{bc}'(t). \quad (3.63)$$

Таким образом, использование имитационной модели, построенной по принципу системной динамики, позволяет получить скорректированные количественные характеристики с учетом обратных связей в системе и взаимодействия элементов системы во времени. По результатам имитационного

эксперимента ЛПР может получить следующие параметры системы транспортировки:

- Тарифы перевозки и обработки грузов с учетом случайных факторов;
- Время доставки ресурсов по маршрутам с учетом случайных факторов;
- Потери по участкам перевозки и хранения;
- Итоговые затраты по участку перевозки с учетом потерь на единицу ресурса (в том числе в сравнении с первоначальными данными);
- Пропускная способность участка перевозки с учетом динамики системы;
- Степень загрузки участка перевозки или точки хранения (остаточная пропускная способность), позволяет выделить критические участки;
- Количество доставленных ресурсов в конечную точку с привязкой к моментам времени и отличия с планируемым количеством. Исходя из чего определяется риск срыва сроков строительства.

Эти параметры могут быть использованы как для корректировки параметров задачи линейного программирования, так и для анализа рисков системы транспортировки. Кроме того, как было описано в главе 2, изменяя входные параметры имитационная модель представляет собой инструмент оценки рисков системы транспортировки.

Выводы к главе 3

1. В результате проведенного анализа существующих методологий имитационного моделирования для создания логистической модели при решении задачи формирования оптимальных транспортных схем доставки грузов на труднодоступные объекты строительства был выбран принцип системной динамики. Выбранная методология позволяет проследить механизмы обратных связей в моделируемой системе, взаимозависимости переменных, рассматривая при этом систему достаточно укрупнено, за счет наибольшей степени абстракции среди существующих принципов построения имитационных моделей.

2. При разработке имитационной модели системной динамики были проанализированы и отражены в модели механизмы формирования обратных связей в системе транспортировки: формирование дополнительных задержек и затрат вследствие непредусмотренных ресурсных потерь ресурсов в процессе доставки и связанной с этим дополнительной загрузки логистической сети. Описание разработанной модели представляет собой систему конечно-разностных уравнений, процесс программного имитационного эксперимента представляет собой численное интегрирование значений, согласно этим уравнениям, с учетом программно реализуемых случайных величин и потоков.

3. Имитационная модель системы доставки грузов на объекты строительства разработана с учетом возможностей масштабирования рассматриваемой логистической сети. Предложено описание отличающихся структурных элементов любой системы транспортировки (начальные, конечные, промежуточные точки и участки перевозки), исходя из которого, возможно построить имитационную модель логистической сети любого размера и сложности.

4. Данные, полученные в результате проведения экспериментов с имитационной моделью, могут быть использованы как при корректировке формирования транспортных схем доставки грузов в линейной постановке, так и для анализа временных и финансовых рисков рассматриваемой системы транспортировки, оценки возможных суммарных затрат по доставке а также вероятности срыва сроков строительства объектов.

4. РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СХЕМ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

4.1. Разработка структуры компьютерной системы поддержки принятия решений для формирования оптимальных транспортных схем доставки грузов на труднодоступные объекты строительства

Большой объем информации, высокая размерность задачи формирования оптимальных транспортных схем доставки грузов, необходимость использования программных средств имитационного моделирования делает невозможной выработку решения без использования компьютерных систем поддержки принятия решений (СППР) [95].

Система поддержки принятия решений должна выполнять следующие функции:

- ввод в определенной форме и обработку исходной точных, вероятностных данных, и экспертных оценок для решения поставленной задачи;
- решение задач линейного программирования для определения оптимальных транспортных схем доставки и распределения грузопотоков в условиях определенности;
- проведение эксперимента с имитационной моделью для анализа воздействия случайных факторов на процесс транспортировки а также для оценки рисков;
- решение задач стохастического программирования с М-критерием градиентными методами для определения оптимальных транспортных схем доставки и распределения грузопотоков в условиях неопределенности с использованием имитационной модели;
- расчет интегрального уровня риска по участкам перевозки на основе качественного анализа выполненного экспертами и формирование критериев риска оптимизационной задачи;

- решение задачи динамического программирования для формирования адаптивного плана транспортировок с учетом возможного изменения плана строительства;
- передача информации между модулями, реализующими соответствующие функции в системе;
- взаимодействие с ЛПР для возможной корректировки и контроля уровня риска в процессе решения задачи а также корректировки экспертных данных;
- вывод в качестве решения оптимального плана транспортировки ресурсов;
- взаимодействие с существующими источниками и базами данных для получения статистической информации или экспертной информации по объектам аналогам;

Таким образом, КСППР обеспечивает ЛПР полным набором необходимых инструментов для решения поставленной задачи.

На рынке существует большое количество программных продуктов для решения задач линейного программирования, а также реализации математических вычислений. Существуют как специализированные вычислительные пакеты такие как Gams, Cplex, LIPS, JOptimizer, XPressMP, AIMMS, LINDO и др., так и многофункциональные: Matlab, Mathcad и др.

Подавляющее большинство имитационных моделей логистических систем создаются с помощью занявших устойчивое место на рынке программных продуктов ПИМ для процессов с дискретными событиями, таких как Arena, AutoMod, eM-Plant, Enterprise Dynamics, Extend, ProModel, QUEST, Simul8 и WITNESS, а также с помощью универсального ПИМ AnyLogic.

Программно реализовать модели системной динамики можно используя такие пакеты как Динамо, Имитак, STELLA, iThink, Vensim, Powersim, Matlab_Simulink, AnyLogic, и др. Компьютерная модель обычно представляется в виде блок-схемы, содержащей типовые функциональные блоки систем управления и управляемых объектов. С формальной точки зрения программные пакеты, реализующие такие модели, описывают процесс численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Рассматриваемая задача предполагает большое количество как исходных данных, так и результатов решения оптимизационных задач и имитационных экспериментов, для структурирования и хранения которых должны быть предусмотрена база данных. Взаимодействие между средствами решения оптимизационных задач и имитационного моделирования может быть реализовано как через MS Excel, так и посредством базы данных MS Access, MS SQL Server др.

В качестве исходных данных для решения рассматриваемой задачи требуются топология транспортной сети, тарифы на перевозку, хранение, дополнительные затраты, периоды работы и пропускные способности участков перевозки, транспортных узлов, вместимость баз хранения; потребность в ресурсах с привязкой ко времени; вероятности и возможные размеры отклонения тарифов; экспертные данные определяющие вероятность возникновения рисков факторов; оценку временных; экспертные данные относительно возможностей изменения проекта строительства с течением времени.

На рисунке 4.1 представлена структурная схема системы поддержки принятия решений формирования транспортных схем доставки грузов, основанная на разработанных моделях и алгоритмах, выполняющей необходимые функции.

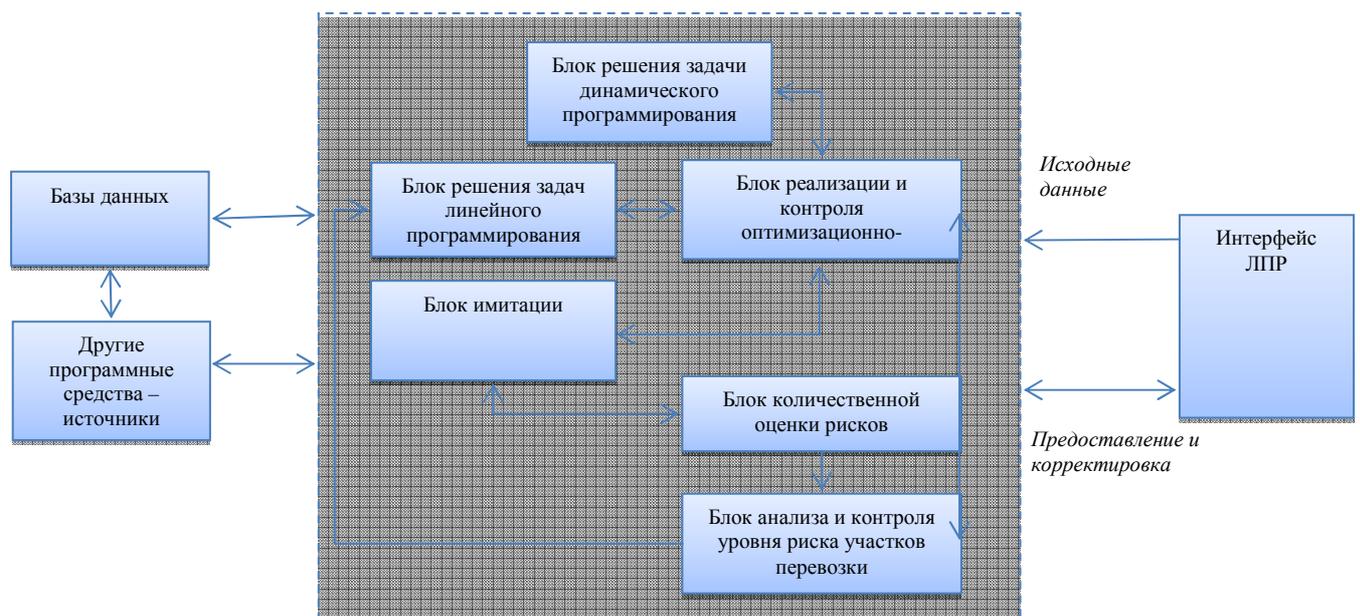


Рисунок 4.1 - Структурная схема разрабатываемой СППР.

Для решения задач линейного программирования, а также транспортной задачи в стохастической М – постановке, реализации метода динамического программирования был использован пакет AIMMS. Обзор его компонентов представлен на рисунке 4.2, этот продукт обладает средствами постановки и решения оптимизационных задач, а также средствами реализации дополнительных задаваемых пользователем математических алгоритмов, анализа чувствительности и др.. AIMMS позволяет реализовать взаимодействие с базами данных и MS Excel, и создавать пользовательский интерфейс GUI, с помощью которого может быть реализовано управление реализацией алгоритма формирования оптимальных транспортных схем доставки грузов с использованием всех представленных в работе методов. AIMMS также обеспечивает C ++ / COM API для внешнего доступа к модели, что позволяет разработчикам использовать AIMMS из внешнего приложения.

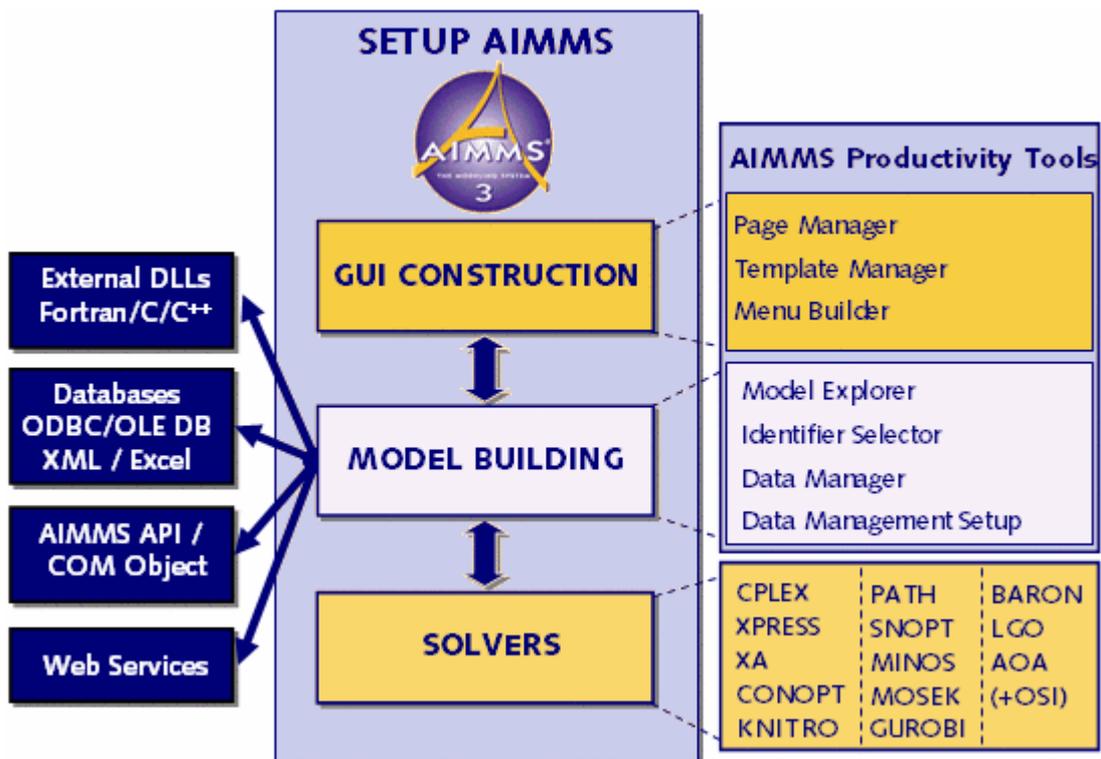


Рисунок 4.2 - Обзор компонентов, доступных в AIMMS.

Для реализации имитационной модели был использован многоподходный инструмент AnyLogic, который позволяет использовать все три методологии имитационного моделирования: системную динамику, агентное и дискретно-событийное моделирование. Anylogic позволяет реализовать взаимодействие между имитационной моделью и источниками данных, такими как MS Excel а также с базами данных MS Access, MS SQL Server, и другими посредством драйвера ODBC. На рисунках 4.3 и 4.4 представлены примеры реализации имитационной модели транспортной сети в среде Anylogic и среда разработки имитационной модели соответственно.

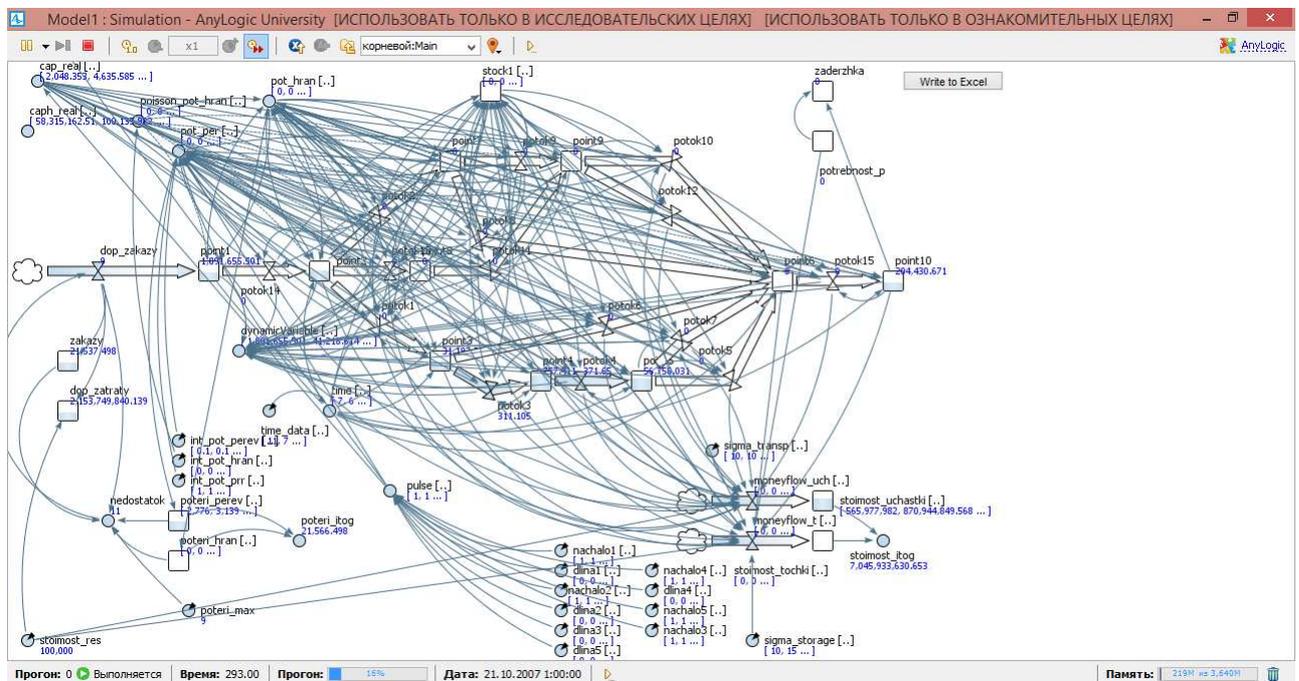


Рисунок 4.3 - Реализация эксперимента имитационной модели участка перевозки в пакете Anylogic.

Этот программный продукт, кроме того, позволяет реализовать различные варианты имитационного эксперимента, такие как:

- эксперимент варьирования параметров, который позволяет оценить степень и характер влияния отдельных параметров на поведение модели. Модель автоматически запускается заданное количество раз с варьирующимися значениями выбранных параметров. Изучить и сравнить поведение модели при разных значениях параметров можно с помощью диаграмм AnyLogic;

- *эксперимент Монте-Карло* позволяет выполнить несколько повторных запусков стохастической модели или модели со стохастически меняющимися параметрами и отобразить полученный набор результатов моделирования с помощью гистограмм;

- *сравнение «прогонов» модели* позволяет интерактивно задавать различные значения параметров и запускать модель с этими значениями. Интерфейс эксперимента содержит диаграммы, одновременно отображающие результаты всех совершенных "прогонов", позволяя тем самым визуально сравнивать результаты моделирования, полученные при тех или иных значениях параметров;

- *анализ чувствительности* помогает оценить чувствительность результатов моделирования от конкретных параметров модели. Он выполняет несколько "прогонов" модели, варьируя значения одного из параметров и показывая, как результаты моделирования зависят от этих изменений.

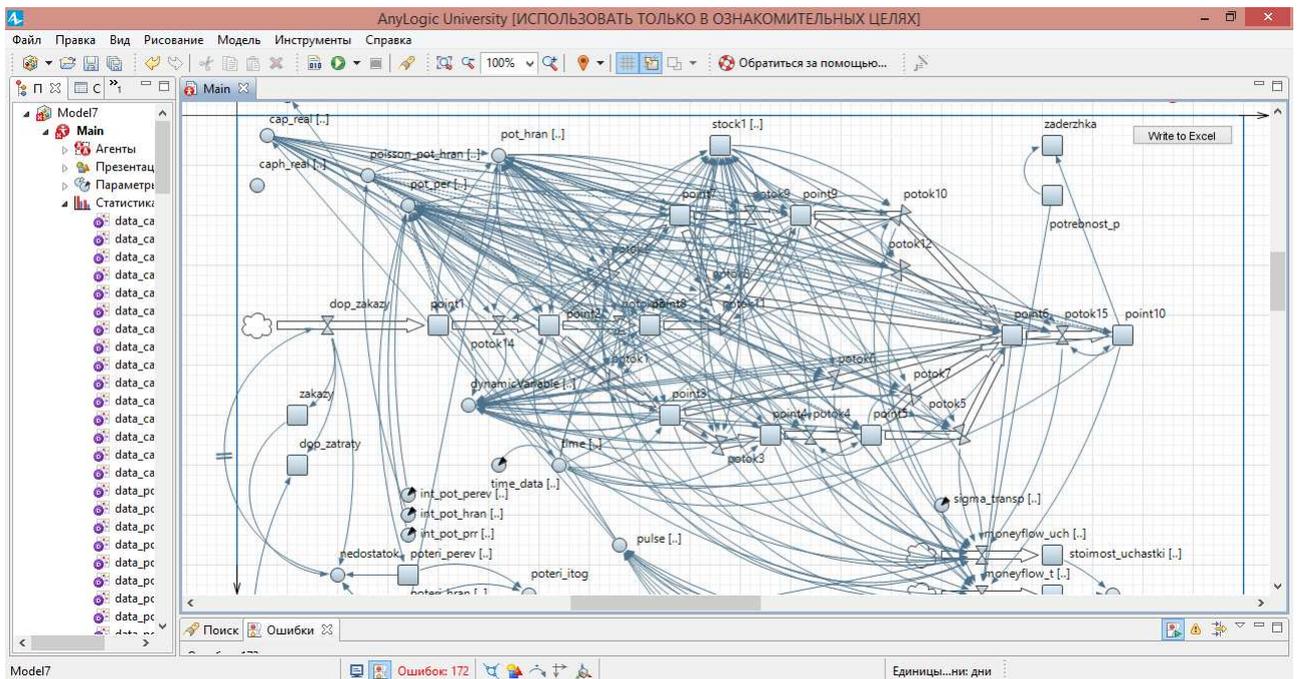


Рисунок 4.4 - Среда разработки имитационной модели участка перевозок в пакете Anylogic.

4.2. Пример формирования оптимальных транспортных схем доставки с использованием разработанных алгоритмов

4.2.1. Описание логистической сети рассматриваемой задачи

Рассмотрим формирование оптимальных транспортных схем доставки грузов на примере строительства объектов обустройства Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. Бованенковское месторождение расположено на полуострове Ямал на расстоянии 120 км от побережья Карского моря. Доставка грузов для обустройства и эксплуатации Бованенковского месторождения осуществляется морским, речным, железнодорожным и автомобильным транспортом (по зимней автодороге).

Все ресурсы сначала доставляются на конечную станцию сети железных дорог общего пользования – ст. Лабытнанги или ст. Архангельск, после чего возможны различные варианты транспортировки. Будем рассматривать следующие варианты (маршруты отражены на рисунке 4.5, возможные транспортные схемы приведены по состоянию на 2007 г.):

- Морской путь
 - маршрут 1.1. ст. Архангельск - Харасавэй – Бованенково (зимник);
 - маршрут 1.2 ст. Архангельск – Харасавэй – Бованенково (вода);
 - маршрут 1.3 ст. Архангельск – рейд р.Мордыяха – Бованенково (вода);
 - маршрут 1.4 ст. Архангельск – Харасавэй – Бованенково (зимник).
- Речной путь
 - маршрут 2.1 ст. Лабытнанги - Харасавэй – Бованенково (вода);
 - маршрут 2.2 ст. Лабытнанги - Харасавэй – Бованенково (зимник);
 - маршрут 2.3 ст. Сергино – Харасавэй – Бованенково (вода);
 - маршрут 2.4 ст. Сергино – Харасавэй – Бованенково (зимник).
- Железнодорожный путь
 - маршрут 3 ст. Лабытнанги – ж/д ст.Хралов (ж/д ст.Бованенково с 2010г.) – Бованенково (зимник);
- Зимняя автомобильная дорога
 - маршрут 4 ст. Лабытнанги (Обская) – Бованенково (зимник).

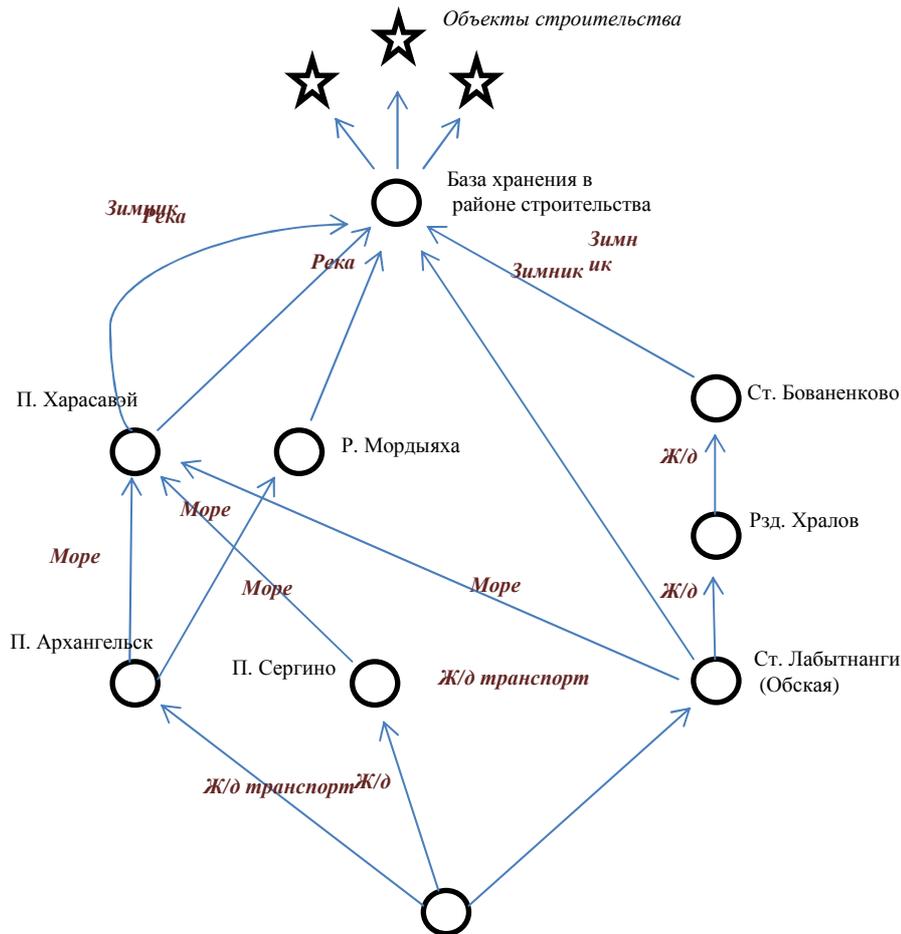


Рисунок 4.5 - Маршруты транспортировки ресурсов на Бованенковское месторождение.

Описание транспортных схем доставки грузов для обустройства и эксплуатации Бованенковского месторождения.

Маршрут 1.1. ст. Архангельск - Харасавэй – Бованенково (зимник)

Доставка грузов по воде осуществляется в летний период (с июня до середины сентября) из Архангельского морского торгового порта (АМТП) в порто-пункт Харасавэй. Основной грузопоток для доставки на полуостров Ямал формируется из Центрального, Северо-Западного и Южного регионов. Грузы железнодорожным транспортом доставляются станцию железной дороги Архангельск-город.

Для приема и накопления судовых партий грузов в порту выделены складские помещения. Грузовые причалы и площадки порта оснащены современным перегрузочным оборудованием. По прибытию в АМТП грузы

доставляются на склад, где осуществляется хранение. Далее грузы доставляются на причал для дальнейшей отправки по маршруту Архангельск – Харасавэй.

Из АМТП грузы доставляются в порто-пункт Харасавэй, расположенный на западном побережье полуострова Ямал. Затем автомобильным транспортом грузы доставляются на склад п.Харасавэй, где осуществляется хранение до начала работы зимней автодороги. По зимнику грузы доставляются на базу временного хранения БГКМ и строительную площадку.

Маршрут 1.2. ст.Архангельск – Харасавэй – Бованенково (вода)

Доставка грузов по маршруту осуществляется аналогично схеме № 1(А) до порто-пункта Харасавэй, где осуществляется хранение. Далее грузы доставляются на причал Харасавэй, где осуществляется погрузка на речной транспорт, доставка по маршруту Харасавэй – Бованенково баржами. Провозные платежи предусматривают тарифную норму загрузки согласно действующих прейскурантов. Однако, опыт работы транспортных компаний показал, что реки Мордыяха и Сеяха обладают повышенной извилистостью на данном водном пути, а также имеют глубины до 0,9 м. Поэтому загрузка баржи уменьшается.

В Бованенково грузы разгружаются на причал, с причала автомобильным транспортом доставляются на промбазу и затем на строительную площадку.

Маршрут 1.3. ст.Архангельск – рейд р.Мордыяха – Бованенково

Грузы железнодорожным транспортом доставляются станцию железной дороги Архангельск-город. По прибытию в АМТП грузы доставляются на склад, где осуществляется хранение. Далее грузы доставляются на причал для дальнейшей отправки по маршруту Архангельск – рейд р.Мордыяха.

От рейда реки Мордыяха и далее по реке Сеяха грузы доставляются до причала Бованенково. В Бованенково грузы разгружаются на причал силами, с причала автомобильным транспортом доставляются на промбазу и затем на строительную площадку.

Маршрут 1.3. Архангельск – Харасавэй (припай) – Бованенково (зимник)

Грузы железнодорожным транспортом доставляются станцию железной дороги Архангельск-город. По прибытию в АМТП грузы доставляются на склад, где осуществляется хранение грузов.

Доставка грузов из Архангельска в период февраля-апреля осуществляется судами с участием двух ледоколов, которые проводят судна от кромки льда в Баренцевом море до места назначения в районе рейда Харасавэй. Один ледокол предназначен для проводки судов по трассе Баренцева и Карского морей, а другой - мелкосидящий для проводки судов к оборудованным грузовым площадкам на ледовом припае прибрежного мелководья в районе мыса Харасавэй, где происходит разгрузка судов на припай на площадки временного складирования. Во время выгрузки судов обязательно дежурство мелкосидящего ледокола. По ледовому припаю и далее по зимней автодороге грузы доставляются автомобильным транспортом на промбазу и далее на строительную площадку.

Маршрут 2.1. ст.Лабытнанги – Харасавэй – Бованенково (вода)

Основной грузопоток для доставки грузов на полуостров Ямал речным транспортом формируется из Центрального, Уральского, Восточного и Сибирского регионов.

Срок навигации по Обской губе в обход полуострова Ямал составляет не более 2,5 месяцев в летний период. В остальной период года Обская губа недоступна для речных судов любого класса из-за ледовой обстановки.

Грузы доставляются железнодорожным транспортом на ст. Лабытнанги, далее осуществляется подача-уборка вагонов до Лабытнангской базы, где грузы разгружаются и доставляются до места складирования для хранения.

Далее грузы доставляются на причал Лабытнангской базы, откуда осуществляется перевозка водным путем в порто-пункт Харасавэй. Грузы разгружаются в порто-пункте Харасавэй на площадку временного складирования и доставляются на склад, где осуществляется хранение.

Далее доставка грузов осуществляется автомобильным транспортом со склада в Харасавэе в порто-пункт Харасавэй, где осуществляется погрузка на

баржи и по Карскому морю через пролив Мутный шар баржи доставляют груз в устье реки Мордыяхи.

От рейда реки Мордыяха и далее по реке Сеяха грузы доставляются до причала Бованенково. Доставка осуществляется баржами. В Бованенково грузы разгружаются на причал, с причала автомобильным транспортом доставляются на промбазу и затем на строительную площадку.

Маршрут 2.2. ст.Лабытнанги – Харасавэй – Бованенково (зимник)

Строительные материалы, изделия и конструкции для обустройства и эксплуатации Бованенковского месторождения доставляются железнодорожным транспортом на станцию Лабытнанги. После прибытия на станцию Лабытнанги, вагоны подаются на территорию Лабытнангской базы ПТОиК, где разгружаются на специальных приемных площадках. Затем автомобильным транспортом доставляются до места складирования и хранения.

Далее грузы доставляются на причал Лабытнангской базы ПТОиК, перегружаются на суда типа река-море. Затем маршрутом вокруг полуострова Ямал по Обской губе доставляются к причальной стенке порто-пункта Харасавэй, где происходит выгрузка грузов на площадку временного складирования, затем автомобильным транспортом они перевозятся на склад, где осуществляется хранение. Далее грузы перевозятся по зимней автодороге на промбазу и строительную площадку.

Маршрут 2.3. ст.Сергино – Харасавэй – Бованенково (зимник)

Схемы доставки грузов по Обской губе с причалов Сергино, Тюмень, Тобольск, Сургут аналогичны схеме доставки водным транспортом №2.2.

Маршрут 2.4. ст.Сергино – Харасавэй – Бованенково (вода)

Схемы доставки грузов по Обской губе с причалов Сергино, Тюмень, Тобольск, Сургут аналогичны схеме доставки водным транспортом №2.1.

Маршрут 3. ст.Лабытнанги – Хралов – Бованенково (зимник)

Доставка грузов железнодорожным транспортом с IV квартала 2007 г. должна осуществляться по железнодорожной линии Обская - Бованенково от ст.

Лабытнанги Северной железной дороги до ст. Хралов. Пропускная способность временной базы промежуточного хранения грузов на раз. Хралов 150 тысяч тонн.

Маршрут 4. ст.Лабытнанги (Обская) – Бованенково (зимник)

Строительные материалы, изделия и конструкции для обустройства Бованенковского месторождения доставляются железнодорожным транспортом до станции Лабытнанги. После прибытия на станцию Лабытнанги, вагоны подаются на территорию Лабытнангской базы, разгружаются на специальных приемных площадках, доставляются на склад, где хранятся до начала работы зимней автодороги. Затем автомобильным транспортом по зимнику доставляются на ПБ БГКМ и далее на строительную площадку.

Краткие характеристики морских, речных портов и железнодорожных станций.

Архангельский морской торговый порт.

Архангельский морской торговый порт (АМТП) предназначен для переработки генеральных грузов, в том числе: металлов; пиломатериалов; контейнеров; тяжеловесного оборудования; навалочных грузов.

АМТП располагает 23 причалами. Ближайшие к порту железнодорожные станции имеют железнодорожные и автомобильные подъездные пути к морскому порту. Железнодорожные пути проложены непосредственно на причалы, что позволяет производить погрузку-выгрузку судов по «прямому варианту» (без складирования на территории порта). На станциях Архангельск, Бакарица имеется контейнерная площадка общей площадью 13750 кв.м. Возможности промежуточного хранения грузов нет.

Занимаемая площадь порта составляет 97,5 га. АМТП является портом круглогодичной навигации. АМТП ежегодно перерабатывает до 4,5 млн. тонн груза. Грузы железнодорожным транспортом доставляются на одну из станций Северной железной дороги: Архангельск-город, и станция Бакарица. Общая площадь крытых складов АМТП составляет 57 055 кв.м, площадь открытых площадок 373 263 кв.м. Сроки хранения грузов и количество грузов, которое

может одновременно храниться на складах, согласовываются при заключении договора.

Грузовые причалы и площадки АМТП оснащены современным перегрузочным оборудованием: 51 портальных и других кранов грузоподъемностью от 5 до 40 тонн, плавкран грузоподъемностью до 100 тонн; средства малой механизации.

Порто-пункт Харасавэй.

Порто-пункт Харасавэй расположен на западном побережье полуострова Ямал. Длина причальной стенки в порто-пункте Харасавэй составляет 386 м. Одновременно под разгрузкой (погрузкой) могут находиться три морские баржи грузоподъемностью 3 000 тн.

В порто-пункте Харасавэй имеется причал для сухогрузов, площадка временного складирования, открытый склад. Площадь площадки причала составляет 11 580 кв.м; площадь открытого склада - 8 750 кв.м.

Завоз грузов в порто-пункт Харасавэй осуществляется по двум направлениям: морские перевозки из Архангельского морского торгового порта; речные перевозки из портов бассейна реки Обь.

Лабытнангский речной порт.

Речной порт Лабытнанги обладает необходимой инфраструктурой и техническими средствами для перевалки грузов на Бованенковское месторождение. Имеются возможности для складирования и хранения грузов. Сроки хранения грузов в зависимости от номенклатуры груза определяются в соответствии с нормативами и условиями договора. Порт оборудован причальной стенкой длиной 386 м. Одновременно под погрузкой и разгрузкой могут находиться две баржи грузоподъемностью 3 000 тн.

Сергинский речной порт.

Занимаемая площадь порта составляет 20,5 га. Сергинский речной порт расположен на расстоянии 4,5 км от железнодорожной станции Приобье.

Порт имеет развитую инфраструктуру производственных мощностей, подъездных и технологических железнодорожных путей, автодороги. На

территории порта имеются внутрипортовые железнодорожные пути протяженностью 2,5 км, в том числе путь вдоль причала. Порт принимает грузы тарно-штучные, навалочные по вариантам вагон-склад, вагон-судно и склад-автомобиль с доставкой до места назначения и выгрузкой их в пунктах назначения своим флотом и погрузо-разгрузочными механизмами. Сергинский речной порт может переработать практически весь перечень грузов и хранить любое их количество в соответствии с номенклатурой. Сергинский речной порт доставляет грузы в порто-пункт Харасавэй мелкосидящими и баржебуксирными судами, осадка которых позволяет подходить к необорудованному берегу. Для производства погрузо-разгрузочных работ в порту имеется девять кранов грузоподъемностью от 10 до 32 тн.

Железнодорожные станции Архангельск-город и Бакарица.

Железнодорожные пути проложены непосредственно на причалы, что позволяет производить погрузку-выгрузку судов по «прямому варианту» (без складирования на территории порта). На станциях Архангельск, Бакарица имеется контейнерная площадка общей площадью 13 750 кв. м. Возможности промежуточного хранения грузов нет. Станции Архангельск, Бакарица имеют железнодорожные и автомобильные подъездные пути, которые имеют выход к морскому порту.

Железнодорожная станция Лабытнанги.

Пропускная способность ст. Лабытнанги 57 вагонов в сутки. Со станции Лабытнанги вагоны подаются тепловозом РЖД на территорию Лабытнангской базы, которая принимает грузы повагонной отправкой (платформы, крытые вагоны, полувагоны, цистерны, спец. вагоны), контейнера 3,5 и 20тн.

База для хранения имеет следующие складские площади: Земельные участки – 213 103 кв.м., отопливаемые склады – 1 944 кв.м., холодные склады – 9 434 кв.м., площадки открытого хранения – 88 906 кв.м., резервная территория – 31 078 кв.м., обработка грузов до 150 тыс. т. в год.

Железнодорожные станции Обская, Хралов.

Пропускная способность железнодорожной линии «Обская-Бованенково» по проекту составляет 3 млн.тонн в год. По состоянию на 2007г. до окончания сдачи в эксплуатацию пропускная способность ограничена до 150 тыс.тонн.

На станции Обская имеются площадки для выгрузки грузов, приёмоотправочный и сортировочные парки, база с двумя выгрузочными тупиками общей протяженностью 1600 п.м, площадки выгрузочная и открытого хранения площадью 22 500 кв.м, два холодных склада площадью 1 290 кв.м.. Пропускная способность временной базы промежуточного хранения грузов на раз. Хралов 150 тысяч тонн.

Таким образом, основными проблемными местами на участках перевозки являются:

- периоды работы автозимников: ноября-декабря по март-апрель;
- периоды навигации: из п. Архангельск с июня по сентябрь, по Обской губе – около 2,5 месяцев в летний период;
- пропускные способности транспортных путей и перевалочных точек;
- вместимость баз хранения.

Тарифы на перевозки морским, речным, автомобильным транспортом, погрузо-разгрузочные работы и прочие затраты, связанные с этими видами транспорта, принимаются в соответствии с данными предоставляемыми транспортными компаниями а также нормативными документами, регламентирующими тарифы.

Основная номенклатура, общий объем грузоперевозок по наименованиям основной номенклатуры, а также сроки поставок грузов для обустройства Бованенковского месторождения и системы транспорта газа принимаются в соответствии с проектными данными.

4.2.2. Реализация разработанных алгоритмов

На основе представленных вариантов транспортных схем, сформированы табличные исходные данные для решения задач с использованием разработанных

алгоритмов. Расчеты выполнены для основной номенклатуры перевозимых грузов по состоянию на 01.01.07г. (представленные данные изменены).

Как было описано выше исходными данными являются пропускные способности участков перевозки, стоимость доставки и хранения и вероятностные характеристики этих величин, а также оценки интенсивности потерь по участкам перевозки и хранения. Периоды работы участков перевозки и их пропускные способности сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 - Основные характеристики, периоды работы и пропускные способности участков перевозки.

Участок транспортн ой схемы	Наименование участка N	Тип перевозки	Период перевозки	Макс. пропускная способность участка в период работы, т. в мес.
1	2	3	4	5
1	ж/д станция отправления - ст. Лабытнанги	ж/д	круглый год	68400
2	ж/д станция отправления - ст. Архангельск	ж/д	круглый год	152400
3	ст.Лабытнанги - ст. Обская	ж/д	круглый год	12500
4	ст. Обская - раз. Хралов	ж/д	круглый год	12500
5	раз.Хралов - ст. Бованенково	ж/д	круглый год с 2011 г.	250000
6	ст. Обская - Бованенково	авто	1 января – 30 апреля, 4 мес.	1000000
7	раз. Хралов - Бованенково	авто	1 декабря – 30 апреля, 5 мес.	1000000
8	порт Архангельск - рейд р. Мордьяха-Бованенково	вода	1 июня – 30 сентября, 4 мес.	1000000
9	порт Архангельск - порто-пункт Харасавэй	вода	1 июня – 30 сентября, 1 февраля – 30 апреля, 3 + 3 мес.	270000
10	порто-пункт Харасавэй - Бованенковское месторождение	авто	1 ноября – 30 марта с 2011 года, 5 мес.	1000000
11	порт Сергино - порто-пункт Харасавэй	вода	1 июня - 30 июля, 2 мес.	270000
12	порто-пункт Харасавэй - Бованенковское месторождение	вода	1 июля- 30 сентября, 3 мес.	180000
13	жд ст. отправления - порт Сергино	ж/д	круглый год	1000000
14	поставщик - жд.ст. отправления	авто	круглый год	1000000
15	ст.Бованенково - Бованенковское месторождение	авто	декабрь - апрель с 2011 г.	1000000

Таблица 4.2 - Стоимость перевозки ресурсов по участкам, руб./т.

Участок транспортной схемы N	Ресурс 1. Трубная продукция					
	Период времени T	1	2	3		T
1	5000	5000	5000			
2	6000	6000	6000			
3	3000	3000	3000			
4	8000	8000	8000			
5	1500	1300	1200			
...						
15	200	100	150			
Участок транспортной схемы N	Ресурс 2. Лесоматериалы					
	Период времени T	1	2	3		T
1	3400	3800	3000			
2	3800	3600	3500			
3	1500	1500	1500			
4	5600	6000	8000			
5	800	1300	1300			
...						
15	0	0	0			
Участок транспортной схемы N	Ресурс 3. Нетканые синтетические материалы					
	Период времени T	1	2	3		T
1	7000	7000	7000			
2	8000	8000	8000			
3	2600	2700	2400			
4	9700	9800	10000			
5	2300	1900	2300			
...						
15	350	400	400			

Таблица 4.3 - Стоимость хранения ресурсов в точках перевалки, руб./т.-сут.

Точка хранения J	Ресурс 1. Трубная продукция					
	Период времени T	1	2	3		T
1	10	10	10			
2	11	11	11			
3	10	9	9			
4	5	5	5			
5	7	8	8			
...						
N	10	10	10			

Продолжение таблицы 4.3.

Точка хранения J	Ресурс 2. Лесоматериалы					
	1	2	3			T
Период времени T						
1	10	10	10			
2	11	11	11			
3	10	9	9			
4	5	5	5			
5	7	8	8			
...						
N	10	10	10			
Точка хранения J	Ресурс 3. Нетканые синтетические материалы					
	1	2	3			T
Период времени T						
1	12	12	12			
2	12	12	12			
3	10	9	9			
4	7	7	7			
5	7	8	8			
...						
N	10	10	10			

По ранним и поздним срокам событий исходя из сетевого графика строительства по данным проектной документации формируется потребность в ресурсах в форме, представленной в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Потребность в i-м ресурсе в t-й период строительства, тн.

Тип Ресурса i	Период строительства T					
	1	2	3	4	...	T
Трубная продукция	500	600	300	200		600
Лесоматериалы	100	100	300	50		300
Лист стальной	700	500	500	200		50
Металлоконструкции	700	1000	300	500		200
Нетканые синтетические материалы	250	300	150	100		300
...						
Щебень, гравий	1500	2000	1000	700		1000

По результатам разработанных алгоритмов, в том числе с использованием имитационной модели, были сформированы матрицы рисков по участкам перевозки, пример матрицы финансовых рисков для железнодорожного участка

перевозки Обская-Бованенково представлен в таблице 4.5. Итоговая матрица рисков по всем участкам транспортировки, на основе которой, формулируются критерии риска оптимизационной задачи, представлена в таблице 4.6.

Таблица 4.5 - Матрица рисков для участка перевозки Обская – Бованенково.

N п/п	Факторы риска	Изменяемые параметры по каждому участку	Изменение переменной модели, %			Изменение значения целевой функции (потери), %		
			Мин.	Среднее (вероятное)	Макс.	Мин.	Среднее (вероятное)	Макс.
1	Увеличение тарифов и сроков доставки, вследствие неполной информации о тарифах и требуемых операциях	$C_{ijt} \tau_{ij}$	5	25	50	2	15	25
2	Задержки на участках перевозки в связи с природными условиями	τ_{ij}	10	30	100	20	50	80
3	Потери ресурсов вследствие стихийных бедствий	$X_{pot_{it}}$	1	5	10	4	10	25
4	Задержки ресурсов вследствие позднего начала работы автозимника	Cap_{it}	2	15	30	5	20	40
5	Несоблюдение сроков строительства дороги, вследствие чего - задержка ресурсов, и уменьшение пропускной способности	Cap_{it}	2	15	30	3	20	50

Продолжение таблицы 4.5.

N п/п	Факторы риска	Изменяемые параметры по каждому участку	Отношение процента изменений функции цели к проценту изменения параметра			Чувствительность функции цели к изменению параметра	Возможность прогнозирования фактора риска
			Мин.	Среднее (вероятное)	Макс.		
1	Увеличение тарифов и сроков доставки, вследствие неполной информации о тарифах и требуемых операциях	$C_{ijt} \tau_{ij}$	0,4	0,6	0,5	1	средняя (определяемая статистически и экспертно)
2	Задержки на участках перевозки в связи с природными условиями	τ_{ij}	2,0	1,7	0,8	8	высокая (определяемая статистически)
3	Потери ресурсов вследствие стихийных бедствий	$Xp_{ot_{it}}$	4,0	2,0	2,5	10	очень низкая
4	Задержки ресурсов вследствие позднего начала работы автозимника	$C_{ap_{it}}$	2,5	1,3	1,3	6	низкая
5	Задержки и увеличение тарифов на доставку, вследствие неквалифицированной работы подрядчиков	$C_{ap_{it}}$	1,5	1,3	1,7	6	средняя (статистически неопределяемая)

Таблица 4.6 - Итоговая матрица рисков по участкам перевозки.

Участок транспортной схемы N	Наименование участка N	Уровень финансового риска, от 1 до 10	Уровень временного риска (задержки ресурсов), от 1 до 10
1	2	3	4
1	ЖД станция отправления - ст. Лабытнанги	1	1
2	ЖД станция отправления - ст. Архангельск	1	1
3	ст.Лабытнанги - ст. Обская	2	2
4	ст. Обская - раз. Хралов	4	2
5	раз. Хралов – ст. Бованенково	6	6
6	ст. Обская - Бованенковское НГКМ	6	6
7	Раз. Хралов - Бованенковское НГКМ	4	5
8	порт Архангельск - рейд р. Мордыха – Бованенковское НГКМ	8	9
9	порт Архангельск - порто-пункт Харасавэй	9	9
10	порто-пункт Харасавэй - Бованенковское НГКМ	7	8
11	порт Сергино - порто-пункт Харасавэй	10	10
12	порто-пункт Харасавэй - Бованенковское НГКМ	7	8
13	жд ст. отправления - порт Сергино	1	1
14	поставщик - жд.ст. отправления	1	1
15	ст.Бованенково - Бованенковское НГКМ	1	1

Результаты работы оптимизационно-имитационных алгоритмов.

Для анализа результатов работы имитационной модели были проведены оптимизационно-имитационные эксперименты с варьированием различных параметров.

Так, если в имитационной модели принимать случайными только тарифы или время перевозки, то среднее значение суммарных затрат по нескольким реализациям соответствует среднему значению затрат (результат представлен на рисунке 4.6).

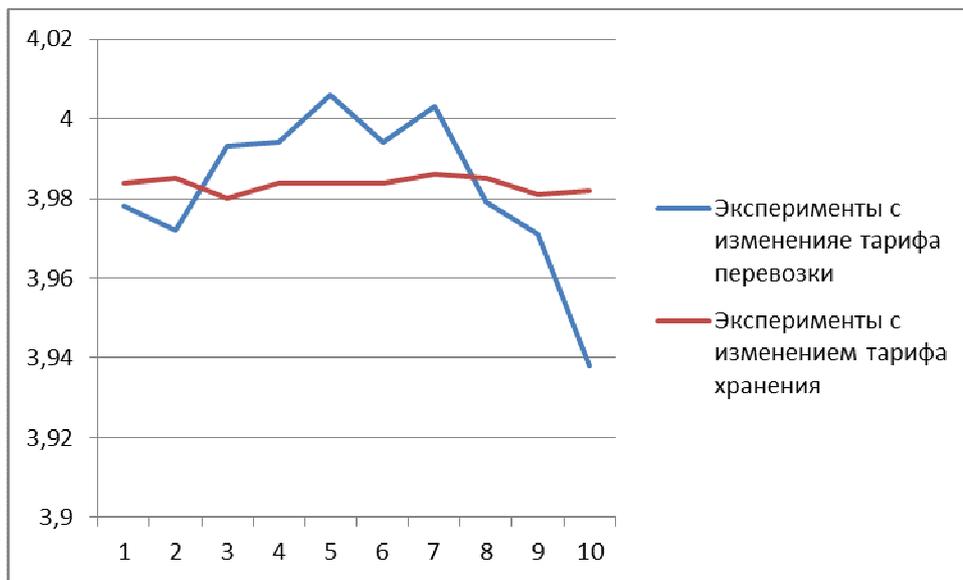


Рисунок 4.6 - Общие затраты млрд. руб при проведении серии экспериментов с варьированием единичных независимых параметров.

Результаты решения оптимизационной задачи и имитационного эксперимента будут отличаться даже при проведении оптимизационно-имитационного эксперимента без учета потерь и вероятностных характеристик переменных за счет динамики системы и оперирования в моделях разными временными интервалами. Имитационная модель обнаружила (рисунок 4.7), что не все ресурсы по результатам имитации доставляются вовремя. При корректировке по результатам имитаций пропускных способностей в задаче линейного S_{ijt} программирования результаты становятся идентичны.

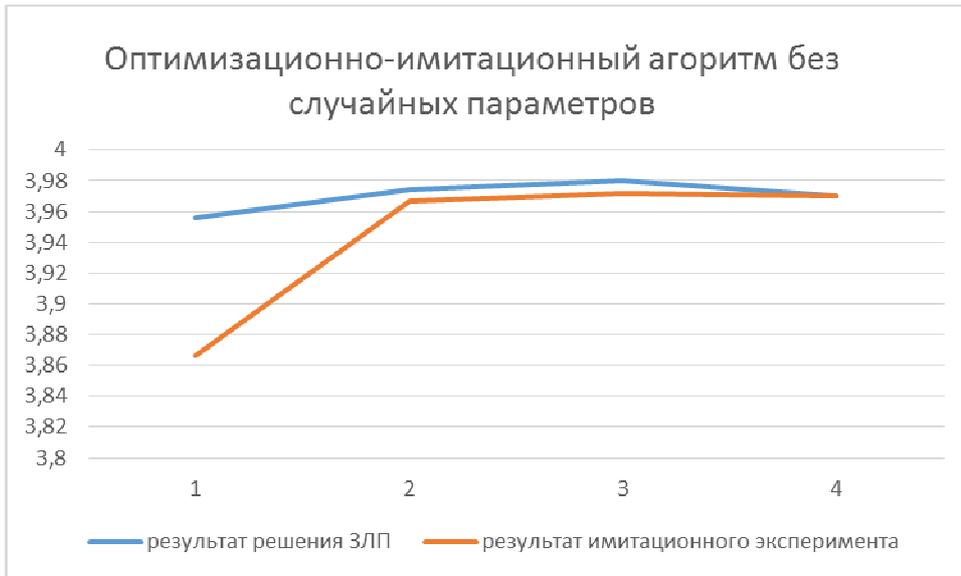


Рисунок 4.7 - Реализация оптимизационно-имитационного алгоритма без учета случайных параметров.

Результаты проведения оптимизационно-имитационных экспериментов при использовании методов, описанных в 1 главе (франка-вульфа (корректировки переменных задачи линейного программирования и корректировке общего количества ресурсов в зависимости от потерь по результатам имитационных экспериментов) и движения вдоль направления спуска и корректировке общего количества ресурсов в зависимости от потерь по результатам имитационных экспериментов) отражены на рис 4.8. и 4.9.

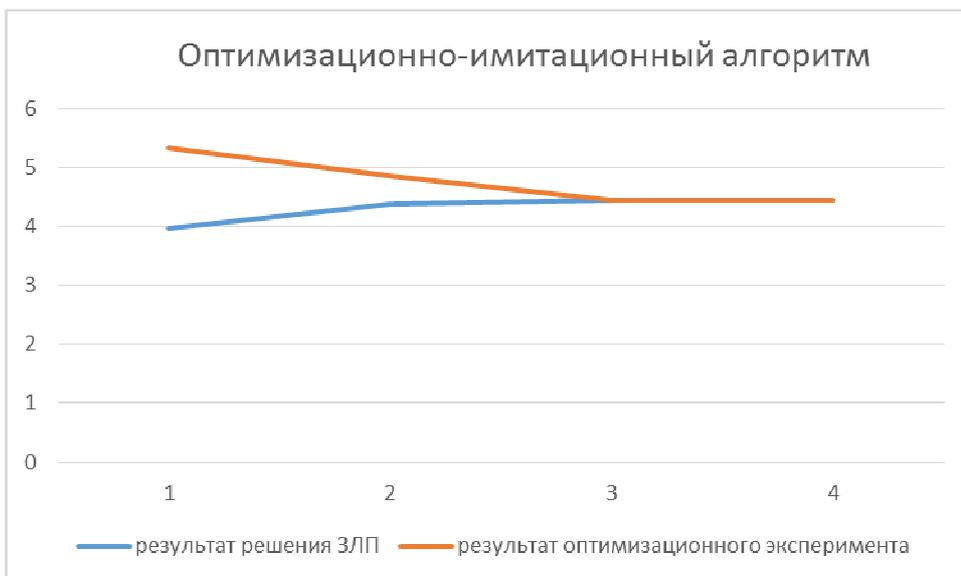


Рисунок 4.8 - Реализация оптимизационно-имитационного алгоритма с корректировкой параметров ЗЛП.

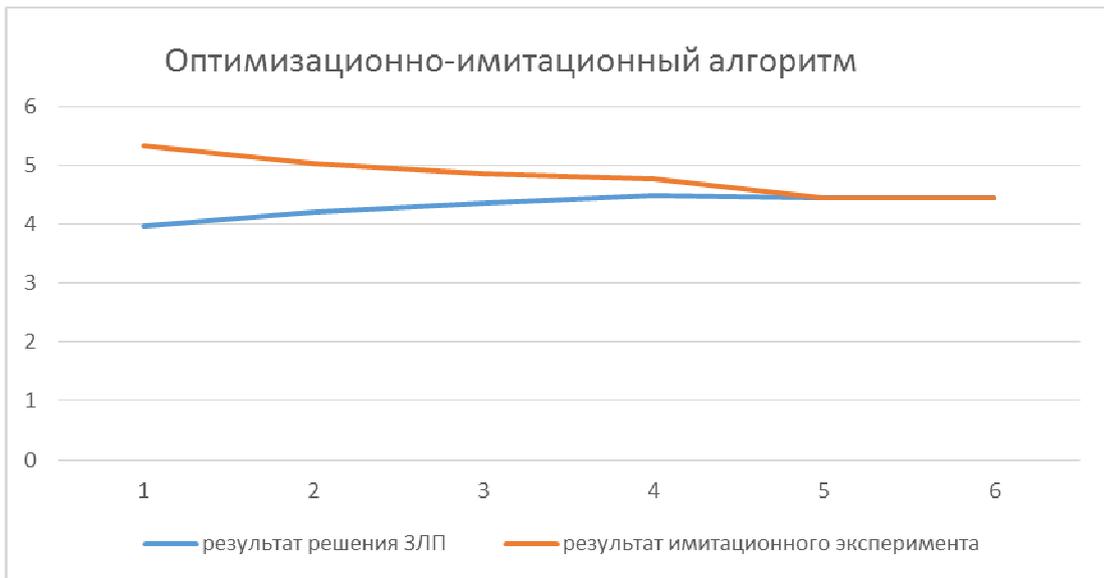


Рисунок 4.9 - Реализация оптимизационно-имитационного алгоритма при движении вдоль направления спуска.

Для первой итерации обоих алгоритмов разница между результатами решения задачи линейного программирования и имитационным экспериментом объясняется большим количеством ресурсных потерь, следовательно в имитационном эксперименте в конечную точку доставляется меньшее количество ресурсов чем планировалось.

С увеличением итераций уменьшается количество ресурсов, недоставленных в точку строительства за весь период времени (рисунок 4.10), что позволяет судить о риске срыва сроков строительства.

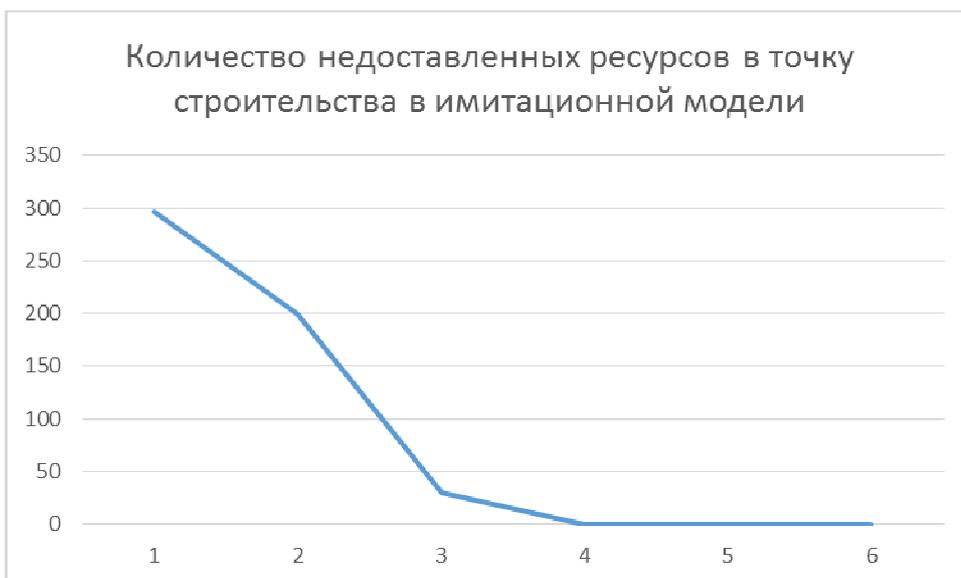


Рисунок 4.10 - Количество недоставленных ресурсов на точку строительства по результатам оптимизационно-имитационного алгоритма.

Таким образом, в зависимости от заданных вероятностных характеристик системы транспортировки при проведении имитационного эксперимента ЛПР получает возможность наблюдать каким образом эти параметры влияют на общие сроки доставки ресурсов, суммарные затраты и потери ресурсов.

Для полученного решения задачи по каждому из этих параметров по результатам имитационных экспериментов могут быть собраны статистические данные (мат. ожидание, дисперсия вероятность не превышения заданной величины и пр.). На основании этих данных ЛПР может сделать выводы о: выполнимости графика строительства или наоборот риске срыва сроков и возможной корректировке сетевого графика; вероятности отклонения суммарных затрат от проектных лимитов.

Выполнение при строительстве полученных рекомендаций позволяет избежать непредвиденных затрат и задержки строительства, а также определить и контролировать возможный лимит отклонений.

Результаты анализа рисков изменения проектных решений и построения адаптивной схемы доставки грузов.

Для использования метода динамического программирования Беллмана для получения адаптивной стратегии с учетом изменения параметров внешней среды было сделано предположение о возможных изменениях проекта строительства с течением времени в зависимости от политической и экономической обстановки. Например, для Бованенковского НГКМ изменение договорных обязательств по поставкам газа в Европу или потребностей для собственных нужд страны ведет либо к ускорению, либо к приостановке строительства. На основе анализа внешней ситуации было предположено следующее изменение плана строительства:

Пусть есть два проекта строительства, первый из которых определяет количество ресурсов Pp_{ijt} , а второму соответствует 60 % от этого количества.

Тогда в первом году строительства план известен - это первый вариант. Для последующих лет переходные вероятности заданы в таблице 4.7:

Номер года	Проект текущего года	Проект следующего года	Переходная вероятность
2	1	1	90%
2	1	2	10%
3	1	1	80%
3	1	2	20%
3	2	1	20%
3	2	2	80%
4	1	1	70%
4	1	2	30%
4	2	1	20%
4	2	2	80%
5	1	1	90%
5	1	2	10%
5	2	1	10%
5	2	2	90%

Таблица 4.7- Переходные вероятности изменения проекта строительства.

В результате реализации оптимизационно-имитационного алгоритма для каждого года строительства были получены распределения грузопотоков X_{ijb} , Y_{ijt} и Z_{ijt} для всех возможных вариантах проекта строительства.

По результатам применения разработанных алгоритмов для решения задачи, детального анализа исходных данных, общего объема необходимых грузов с разбивкой по годам строительства, возможности использования всех видов транспорта, а также анализа сравнительных технико-экономических характеристик, рекомендуются следующие маршруты доставки грузов для обустройства Бованенковского месторождения:

- Морской путь: маршрут 1.1, маршрут 1.2.
- Речной путь: маршрут 2.1, маршрут 2.2; маршрут 2.3
- Железнодорожный путь: маршрут 3
- Зимняя автомобильная дорога: маршрут 4

По результатам расчета получены распределение грузопотоков X_{ijb} , Y_{ijt} и Z_{ijt} по указанным маршрутам, а также средневзвешенная стоимость доставки грузов

на объекты строительства Бованенковского месторождения. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

Железнодорожный транспорт является наиболее выгодным и наименее рисковым для доставки грузов на п-ов Ямал. Грузоперевозки по железной дороге до конечного пункта можно осуществлять в течение всего года, при этом вероятность срывов сроков доставки МТР минимальна по сравнению с доставкой с использованием водных артерий и зимников, зависящих от природно-климатических условий. Недостатком данного маршрута являются ограничения пропускной способности и некоторые ограничения по перевозке крупногабаритных грузов. С 2010г. доставку грузов намечено осуществлять по железной дороге до ст.Бованенково. Однако до окончания строительства железнодорожной линии Обская - Бованенково необходимо учитывать риски сверхнормативного хранения грузов на участке ст. Обская – р. Хралов вследствие позднего начала работы зимней автодороги. Кроме того, концепция транспортного обеспечения строительства объектов обустройства БГКМ, ориентированная на пропуск основного грузопотока по строящейся железной дороге Обская – Бованенково сопряжена с рисками, связанными с вводом в установленные сроки железной дороги, задержкой проектирования и строительства временной перевалочной базы в р.Хралов, а также с необходимостью совмещения по срокам строительства Бованенковского НГКМ со строительством железной дороги «Обская-Бованенково» на участке Хралов - Бованенково.

Возможности накопления грузов на р. Хралов до момента перевозки по зимнику от р.Хралов до ст. Бованенково ограничены 2-3 месяцами, т. е. носят сезонный характер, в тоже время перевозка основных грузов для строительства самой ж/д линии имеет тот же временной период. В течение 2-3 месяцев невозможно накопить объем груза необходимый для строительства объектов Бованенковского НГКМ.

Эффективна также доставка грузов морским транспортом с выгрузкой на ледовый припай в районе Харасавэя. Этот маршрут является наименее затратным,

так как нет необходимости в межсезонном хранении грузов, и обеспечивается прямая транспортировка грузов по зимнику с места разгрузки в район Бованенковского месторождения. Однако, период завоза грузов на припай ограничен и возможен в течение 2,5-3 месяцев, что также является фактором риска задержки доставки ресурсов и сверхнормативных затрат на хранение.

Использование большого количества маршрутов определяется большим грузопотоком и ограниченными пропускными способностями участков перевозки то есть невозможностью доставить все необходимые ресурсы, используя малое число маршрутов.

По результатам сравнения решения, полученного с использованием разработанных алгоритмов и транспортных схем, утвержденных проектными данными, наблюдается уточнение средневзвешенной стоимости доставки в большую сторону за счет перераспределения ресурсов на более дорогие маршруты для снижения рисков, и учета возможных потерь на участках перевозки. При этом маршруты доставки при решении оптимизационной задачи соответствуют данным проекта, с учетом незначительного перестроения грузопотоков.

Выводы к главе 4

1. Использование разработанных алгоритмов при решении задачи формирования транспортных схем доставки грузов большой размерности подразумевает разработку компьютерной системы поддержки принятия решений. Разработанные модели определяют функции и структуру разработанной схемы компьютерной системы поддержки принятия решений.

2. Рассмотренный пример показал, что предложенные модели и алгоритмы формирования оптимальных транспортных схем доставки грузов позволяют находить решение, учитывая многофакторный характер принимаемых решений, обратные связи в системе транспортировки и неточные исходные данные. В результате учета случайных факторов происходит уточнение средней

стоимости транспортировки единицы груза от завода изготовителя до объекта строительства, что приводит к меньшим корректировкам сметной документации при строительстве объекта, уменьшению непредвиденных затрат. С учетом проведенного анализа рисков на участках маршрутов доставки грузов согласно разработанному алгоритму были скорректированы итоговые транспортные схемы доставки грузов на объекты строительства. Снижение уровня риска для планируемых маршрутов доставки приводит к большей вероятности соблюдения сроков транспортировки а также к меньшему риску изменения итоговой стоимости доставки ресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование, направленное на создание моделей и алгоритмов для решения задач планирования оптимальных транспортных схем доставки грузов в отдаленные и труднодоступные регионы строительства, позволяет зафиксировать следующие выводы:

1. На основе системного анализа факторов, влияющих на формирование схем доставки грузов в отдаленные и труднодоступные регионы строительства нефтегазовой отрасли, разработана структура компьютерной системы поддержки принятия решений (КСППР), предложены входящие в ее состав модели и алгоритмы и принципы их взаимодействия, обеспечивающие формирование функционально и экономически обоснованного плана транспортировок с учетом факторов неопределенности и риска.

2. Задачу оптимального распределения грузопотоков по маршрутам и периодам доставки с учетом предполагаемых сроков строительства предлагается решать с использованием оптимизационно-имитационного алгоритма. Для учета результатов имитационного моделирования в оптимизационной задаче предложено рассматривать поставленную задачу как задачу стохастического математического программирования в M -постановке, в качестве критерия которой используется критерий минимума математического ожидания затрат при различных поведениях внешней среды в процессе транспортировки.

3. Разработана имитационная модель системной динамики, реализующая процесс доставки грузов во времени по заданной транспортной сети с учетом стохастического характера переменных задачи, их взаимозависимостей, а также обратных связей в системе транспортировки.

4. Для системного учета факторов неопределенности и риска при формировании оптимальных транспортных схем предложен алгоритм количественного анализа рисков участков перевозки и системы транспортировки в целом. Сформулирована многокритериальная задача линейного программирования распределения грузопотоков по маршрутам доставки, которая

позволяет получить оптимальное решение, приемлемое как с точки зрения суммарных затрат, так и с учетом оценки рисков системы транспортировки.

5. Разработана стохастическая модель выработки адаптивной оптимальной стратегии транспортировки ресурсов с учетом риска изменения проекта строительства, где случайный процесс изменения проекта описывается Марковской цепью, которая позволяющая в условиях неопределенности осуществить принципы скользящего планирования при реализации поставок грузов.

6. С использованием программных продуктов AIMMS и Anylogic разработан комплекс программ для реализации функционала разработанных моделей и алгоритмов и проведены расчеты по контрольным примерам формирования оптимальных транспортных схем доставки материально-технических ресурсов, подтвердившие работоспособность предложенных алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А.Ф., Зубарева В.Д., Саркисов А.С. Оценка эффективности и рисков инновационных проектов нефтегазовой отрасли: Учебное пособие. - М.: МАКС Пресс, 2007. - 240 с.
2. Антонова Г.М. Цвиркун А.Д. Оптимизационно-имитационное моделирование для решения проблем оптимизации сложных производственных систем // Проблемы управления. - 2005 - №5 - С. 19-27.
3. Аоки М. Оптимизация стохастических систем. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1971. - 424 с. с илл.
4. Бауэрсокс Дональд Дж., Клосс Дейвид Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок. - М.: Олимп-Бизнес, 2001.- 640с.
5. Беленький А.С., Левнер Е.В. Применение моделей и методов теории расписаний в задачах оптимального планирования на грузовом транспорте: Обзор // Автоматика и телемеханика. - 1989. - №1. - С. 3-77.
6. Беллман Р. Динамическое программирование. - М.: Изд-во иностр. лит., 1960. - 400 с.
7. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. - М.: Наука, 1965. - 346 с.
8. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. - М.: Мир. - 1976. - С. 172-215.
9. Белов В. В., Воробьев Е. М., Шаталов В. Е. Теория графов. - М.: Высш. школа, 1976. - 392с.
10. Беляев В.М., Володина О.П. Подход к формированию системы доставки грузов «точно в срок» // Бизнес и логистика -98: Сб. материалов 2-й международной конференции- семинара «Логистика и бизнес-98», Москва, 1998. – М.: Брандес, - 1998. - С. 232.
11. Букан Дж., Кенигсберг Э. Научное управление запасами / пер. с англ. – М.: Наука, 1967. - 423с.

12. Бурков В.Н., Грацианский Е.В., Дзюбко С.И., Щепкин А.В., Модели и механизмы управления безопасностью. – М.: Синтег, 2001. - 140 с.
13. Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Новиков Д.А. Теория графов в управлении организационными системами. - М.: Синтег, 2001. - 124 с.
14. Бусленко Н.П. Математическое моделирование производственных процессов на цифровых вычислительных машинах. - М.: Наука, 1964.
15. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1968. - 356 с.
16. Бусленко Н.П., Голенко Д.И., Соболев И.М., Срагович В.Г., Шрейдер Ю.А. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). - М.: Физматгиз, 1962.
17. Вагнер Г. Основы исследования операций. - М.: Мир, 1973. Т.1. 335 с., Т.2. 488с., Т.3. - 501с.
18. Вазан М. Стохастическая аппроксимация. - М.: Мир., 1972. - 295с.
19. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология: учебное пособие. - М.: КНОРУС, 2010. - 192 с.
20. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2000. - 386 с: ил.
21. Волков И.К. Загоруйко Е.А. Исследование операций: Учеб. для ВУЗов. – М.: Изд. МГТУ им. Н Э.Баумана, 2000. - 436 с.
22. Воронов А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем. – М.: Наука, 1985. - 352с.
23. Гихман И.И., Скороход А.В. Управляемые случайные процессы. — Киев: Наук. думка, 1977. - 276 с.
24. Глухов В. В. Математические методы и модели для менеджмента. – СПб.: Лань, 2005. - 528с.
25. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Высшая школа, 2000.

26. ГОСТ Р 51901.4-2005 «Менеджмент риска. Руководство по применению при проектировании».
27. ГОСТ Р 52806-2007 Менеджмент рисков проектов. Общие положения.
28. Грачева М.В. Анализ проектных рисков. - М.: Финстатинформ, 1999. - 215с.
29. Гурин Л.С. Дымарский Я.С. Меркулов А.Д. Задачи и методы оптимального распределения ресурсов. - М.: Советское радио, 1968.
30. Данциг Дж. Линейное программирование, его применения и обобщения. - М.: Прогресс, 1966. - 379 с.
31. Долгов А.П., Козлов В.К., Уваров С.А. Логистический менеджмент фирмы: концепция, методы и модели: Учебное пособие. - СПб.: Бизнес-пресса, 2005. - 384 с.
32. Дворецкий С.И., и др. Компьютерное моделирование технологических процессов и систем. Учебное пособие. - Тамбов: ТГТУ, 2006. - 158 с.
33. Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. - М.: Наука, 1986. - 296 с.
34. Дудорин В.И., Алексеев Ю.Н. Системный анализ экономики на ЭВМ. - М.: Финансы и статистика, 1986. - 191 с.
35. Духанов А.В. Медведева О.Н. Имитационное моделирование сложных систем. - Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. - 115 с.
36. Дынкин Е.Б. Марковские процессы. - М.: Физматгиз, 1963. - 860 с.
37. Дынкин Е.Б., Юшкевич А.А. Управляемые марковские процессы и их приложения. - М.: Наука, 1975. - 339 с.
38. Дэвис М.Х.А. Линейное оценивание и стохастическое управление. - М.: Наука, 1984. - 208 с.
39. Емельянов С.В., Ларичев О.И. Многокритериальные методы принятия решений. - М.: Знание, 1985. - 32 с.
40. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. - М.: Наука, 1971. - 328 с.

41. Ермольев Ю.М. Мельник И.М. Экстремальные задачи на графах. - К.: Наукова думка, 1968. - 176 с.
42. Ермольев Ю.М. Методы стохастического программирования. - М.: Наука, 1976. - 240 с.
43. Ермольев Ю.М. Ястремский А.И. Стохастические модели и методы в экономическом планировании. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1971. - 256 с.
44. Завриева М.К. Комбинированный метод штрафов и стохастических квазиградиентов для поиска связанного максимина. - М.: Выч. центр акад. наук СССР, 1989. - 39с.
45. Замков О.О., Толстопятенко А.В., Черемных Ю.Н. Математические методы в экономике: Учебник. - М.: Изд-во МГУ, Диас, 1997.
46. Зонтейдейк Г. Методы возможных направлений. - М.: Изд-во иностр. лит., 1963. - 176 с.
47. Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. - М.: Радио и связь, 1987. - 20с.
48. Идрисов А. Анализ чувствительности инвестиционных проектов // Инвестиции в России. - 1994. - №3- С.37-40.
49. Ильин Н.И., Шапиро В.Д. и др., Управление проектами. - СПб.:Изд. ДваТри, 1996. - 610 с.
50. Имитационное моделирование производственных систем / Под. ред. А.А. Вавилова. - М.: Машиностроение; Берлин: Ферлаг Техник, 1983. - 416с.
51. Кини Р.Л. Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. - М.: Радио и связь, 1981. - 560 с.
52. Кобелев Н.Б. Особенности имитационного моделирования сложных экономических систем: Учеб. Пособие. - М.: Дело, 2003. - 336с.
53. Кремер Н.Ш., Прутко Б.А., Тришин И.М., Фридман М.Н. Исследование операций в экономике: учеб. пособие. - М.: Юрайт, 2010. - 430с.
54. Кристофер М. Логистика и управление цепочками поставок / пер. с англ. под общ. ред. В.С. Лукинского. - СПб.: Питер, 2005. - 316с.

55. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. - М.: Мир. 1978. - 247 с.

56. Крылова О.В. Об оптимизационно-имитационном подходе к выбору транспортных схем доставки грузов в отдаленные и труднодоступные регионы строительства объектов нефтегазовой отрасли / Крылова О.В., Степин Ю.П. // Сборник докладов шестой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2013). Том 2. – Казань: Изд-во «ФЭН» Академии наук РТ. - 2013. - С. 318-322.

57. Крылова О.В. Об оптимизационно-имитационном подходе к выбору транспортных схем доставки грузов в отдаленные и труднодоступные регионы строительства. / Крылова О.В. // Материалы научно-практической конференции молодых ученых и специалистов среди научно-исследовательских и проектных предприятий ОАО «Газпром» по теме «Актуальные вопросы проектирования объектов добычи и транспорта газа». - Нижний Новгород: Гипрогазцентр. - 2013.- С. 82-84.

58. Крылова О.В. Задача выбора вариантов схем доставки грузов в стохастической постановке / Крылова О.В. // Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность: тезисы докладов пятой международной молодежно-практической конференции. – М.: Газпром ВНИИГАЗ. - 2013.- С.167.

59. Крылова О.В. Об оптимизационно-имитационном подходе к выбору транспортных схем доставки грузов / Крылова О.В., Степин Ю.П. // Тезисы докладов девятой всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности». – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2011. - С. 254.

60. Крылова О.В. Формирование транспортных схем доставки грузов с применением имитационного моделирования / Крылова О.В. // Тезисы докладов юбилейной десятой всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (газ, нефть, энергетика). - М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. - 2013. - С. 189.

61. Крылова О.В. Анализ рисков с использованием оптимизационно-имитационного моделирования при выборе транспортных схем доставки грузов / Крылова О.В., Степин Ю.П. // Наука и техника в газовой промышленности. - 2013. - №3. - С. 90-95.

62. Крылова О.В. Модель системной динамики для оптимизационно-имитационного подхода к выбору схем доставки ресурсов / Крылова О.В., Степин Ю.П. // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. - 2012. - №3. – С. 13-16.

63. Крылова О.В. Оптимизационно-имитационный подход к выбору транспортных схем доставки грузов / Крылова О.В., Степин Ю.П. // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2011. - №3. – С. 23-26.

64. Крылова О.В. Постановка оптимизационной модели выбора транспортных схем доставки грузов с учетом анализа рисков / Крылова О.В., Степин Ю.П. // Наука и техника в газовой промышленности. – 2014. - №3. - С. 90-97.

65. Кудрявцев А.А. Модели и вычислительные средства поддержки решений при разработке стратегии развития и реконструкции систем транспорта газа: Дис... канд.техн.наук - М.: РГУНГ им. И.М. Губкина, 2002.

66. Лотов В.А., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений: учебное пособие. - М.: МАКС Пресс, 2008. -197 с.

67. Лубенцова В.С. Математические модели и методы в логистике.: учеб. пособ. - Самара.: Самар. гос. техн. ун-т., 2008. - 157 с.: ил.

68. Лукинский В.С. Плетнева Н.Г. Транспортная логистика: алгоритм многокритериального выбора маршрута перевозки // Вестник ИНЖЕКОНА. Вып. 4(5). - СПб.: СПбГИЭУ, - 2004. - С. 156 – 162.

69. Лычкина Н.Н. Современные технологии моделирования и их применение в информационных бизнес-системах. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.anylogic.ru/upload/iblock/049/0498c3885e7d7b5dc8ac3dd4f261bca0.pdf>

70. Лэсдон Л.С. Оптимизация больших систем. - М.: Наука, 1975. - 432 с.

71. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. - М.: Мир, 1981. - 323 с.
72. Михалевич В.С., Трубин В.А., Шор Н.З. Оптимизационные задачи производственно-транспортного планирования. - М.: Наука, 1986. - 264 с.
73. Мицель А.А., Шелестов А.А. Методы оптимизации. Часть 1: Учебное пособие. - Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2002. - 192 с.
74. Модели и методы теории логистики: Учебное пособие. 2-е изд./ Под ред В.С. Лукинского. - Спб.: Питер, 2008. - 448 с.
75. Налимов В.В. Теория эксперимента. - М.: Наука, 1971.
76. Никифоров В.С. Мультимодальная перевозка и транспортная логистика: Учебное пособие. - Новосибирск: НГАВТ, 1999. - 103с.
77. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. - М.: Физматлит, 2002. - 144с.
78. Оре О. Теория графов. - М.: Наука, 1980. - 336 с.
79. Павлова Е.И. Экология транспорта. Учебник. — М.: Транспорт, 2001. - 210 с.
80. Письмо Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству от 1 марта 2007 г. N 02-302 Порядок определения платы и ее предельных размеров за загрязнение окружающей природной среды, размещение отходов, другие виды вредного воздействия. (в ред. Постановления Правительства РФ от 14.06.2001 N 463, с изм., внесенными решением Верховного Суда РФ от 12.02.2003 N ГКПИ 03-49)
81. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. - М.: Наука, 1982. - 256 с.
82. Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 №87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к ее содержанию».
83. Пугачев В.С., Сеницын И.Н. Теория стохастических систем. - М.: Логос, 2000. - 1000с.

84. Райфа Г. Анализ решений (введение в проблему выбора в условиях неопределенности).-М.:Наука, 1977.- 408с., ил.
85. Растрингин Л.А. Адаптация сложных систем. - Рига: Зинатне, 1981. - 375 с.
86. Резников Б.А. Теория систем и оптимального управления. Часть 3. Принятие решений в условиях неопределенности и адаптация. – Учебник. - МО СССР, 1988. - 140 с.
87. Рейзлин В.И. Численные методы оптимизации. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 105с.
88. Саати Т., Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. - 320 с.
89. Скурихин В.И. Забродский В.А. Копейченко Ю.В. Адаптивные системы управления машиностроительным производством. – М.: Машиностроение, 1989. - 208с.
90. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. - М.:Физматгиз, 1968.
91. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. – М.: Высш. шк., 2001. - 343 с.
92. Справочная документация Anylogic [Электронный ресурс]. URL: <http://www.anylogic.ru/anylogic/help/>.
93. Степин Ю.П. Об одном подходе к моделированию и оптимизации функционирования нефтегазовых производственных систем.// Изв.вузов.- М.:Нефть и газ, - 1998. - №2 - С.30-32.
94. Степин Ю.П. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка управления нефтегазовыми технологическими процессам и производствами. Том 1. Методы и алгоритмы формирования управленческих решений. Учебное пособие, 2007. - 384 с.
95. Степин Ю.П., Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка управления нефтегазовыми технологическими процессами и производством: Книга 2. Методы поддержки принятия управленческих решений при планировании и динамике управления - М.:МАКС Пресс, 2008. - 528 с.

96. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. — М.: Сов. радио, 1977. - 488 с.
97. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. - М.: Синтег, 1998. - 376с.
98. Трахтенгерц Э.А., Степин Ю.П., Андреев А.Ф. Компьютерные методы поддержки принятия управленческих решений в нефтегазовой промышленности. - М.: Синтег, 2005.
99. Тюкин И. Ю., Терехов В. А., Адаптация в нелинейных динамических системах. - СПбг: ЛКИ, 2008. - 384 с.
100. Урясьев С.П. Адаптивные алгоритмы стохастической оптимизации и теории игр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. - 184с.
101. Фомин В.Л., Фрадков А.Н., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. - 448 с.
102. Форрестер Дж. Мировая динамика. - М.: Изд-во АСТ, 2003. - 379с.
103. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия (Индустриальная динамика). - М.: Прогресс, 1971. - 340 с.
104. Хедли Дж. Нелинейное и динамическое программирование, пер. с англ., - М., 1967.
105. Ховард Р. Динамическое программирование и марковские процессы. - М.: Сов. радио, 1964.
106. Цвиркун А.Д., В.К. Акинфиев, В.А. Филиппов Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем (оптимизационно-имитационный подход).- М.: Наука,1985.
107. Шахназарова И.В. Синтез децентрализованной системы обработки информации и управления нефтегазодобывающим предприятием: Дис... канд.техн.наук - М.:ВНИИОЭНГ, 1984.
108. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем - искусство и наука. - М.: Мир, 1978. - 420 с.
109. Шепелев И.Г. Математические методы и модели управления в строительстве: Учеб. Пособие для вузов. - М.:Высш школа, 1980. - 213 с., ил.

110. Штоер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения приложения: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1992. - 504 с: ил.
111. Almeder C., Preusser M. A toolbox for simulation-based optimization of supply chains. // Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference, - pp. 1932-1939.
112. Aven T. Misconceptions of risk. – John Wiley and Sons, Inc, 2010. - 248pp.
113. Aven T. Risk Analysis. Assessing uncertainties beyond expected values and probabilities. – 1 ed., John Wiley and Sons, Inc, April 2008. - 204pp.
114. Aven T., Vinnem J.E. Risk Management: With applications from the offshore petroleum industry. – Springer, 2007. - P.211.
115. Shapiro J.F. Modeling the Supply Chain – Duxbury / Thomson Leading, 2001. - 586pp.