



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

---

ФАКУЛЬТЕТ «Информатика и системы управления (ИУ)»

КАФЕДРА «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии (ИУ7)»

**РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
***К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ***  
***НА ТЕМУ:***

**«Оптимизация планирования грузоперевозок в транспортной  
системе с использованием метода потенциалов»**

Студент группы **ИУ7-82Б**

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

**В.А. Иванов**

\_\_\_\_\_  
(И.О. Фамилия)

Научный руководитель

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

**М.Ю. Барышникова**

\_\_\_\_\_  
(И.О. Фамилия)

Нормоконтролёр

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

\_\_\_\_\_  
(И.О. Фамилия)

**2022 г.**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

---

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ИУ-7

И. В. Рудаков

(И.О.Фамилия)

«1» декабря 2021 г.

## **ЗАДАНИЕ**

### **на выполнение выпускной квалификационной работы бакалавра**

Студент группы ИУ7-72Б

Иванов Всеволод Алексеевич  
(фамилия, имя, отчество)

Тема квалификационной работы

#### **Оптимизация планирования грузоперевозок в транспортной системе с использованием метода потенциалов**

Источник тематики (НИР кафедры, заказ организаций и т. п.)

НИР кафедры

Тема квалификационной работы утверждена распоряжением по факультету ИУ №03.02.01-04.03/20 от «9» декабря 2021 г.

#### **Часть 1. Аналитический раздел**

*В первой части работы необходимо провести анализ предметной области с целью выявления проблем транспортировки товаров в сфере малого бизнеса. Проанализировать существующие алгоритмы оптимизации ресурсов, обосновать выбор базового алгоритма и определить направления его модификации. Разработать математическую модель исследуемой системы, сформулировать критерии оптимизации и ограничения на реализацию предлагаемого метода.*

#### **Часть 2. Конструкторский раздел**

*Во второй части необходимо подробно описать шаги разрабатываемого метода планирования грузоперевозок с учётом выбранных критериев оптимизации. Разработать структуру программного обеспечения, определить требования к формату входных и выходных данных. Описать компоненты программы и их взаимодействие, а также*

ключевые структуры данных, которые будут использоваться при реализации разработанного алгоритма.

### **Часть 3. Технологический раздел**

В третьей части необходимо обосновать выбор программных средств реализации метода оптимизации планирования грузоперевозок. Разработать графический интерфейс пользователя для ввода данных и отображения результатов работы программы. Привести примеры работы программы. Описать используемые методы тестирования программного обеспечения и привести его результаты.

### **Часть 4. Исследовательский раздел**

В четвёртой части необходимо исследовать зависимость результатов работы метода от различных параметров системы.

### **Оформление квалификационной работы:**

Расчётно-пояснительная записка на 30-80 листах формата А4.

Перечень графического (иллюстративного) материала (чертежи, плакаты, слайды и т. п.)

Презентация на 15-20 слайдах.

---

---

---

Дата выдачи задания « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202 г.

В соответствии с учебным планом выпускную квалификационную работу выполнить в полном объёме в срок до « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

Руководитель квалификационной работы

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

**М. Ю. Барышникова**

(И.О.Фамилия)

Студент

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

**В. А. Иванов**

(И.О.Фамилия)

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана**  
**(национальный исследовательский университет)»**  
**(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**

**ФАКУЛЬТЕТ ИУ**

**УТВЕРЖДАЮ**

**КАФЕДРА ИУ-7**

Заведующий кафедрой ИУ-7

**ГРУППА ИУ7-72Б**

\_\_\_\_\_ И. В. Рудаков

«1» декабря 2021 г.

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН**

**выполнения выпускной квалификационной работы**

студента: Иванова Всеволода Алексеевича

Тема квалификационной работы: **Оптимизация планирования грузоперевозок в транспортной системе с использованием метода потенциалов**

№ п/п	Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Сроки выполнения этапов		Отметка о выполнении	
		план	факт	Должность	ФИО, подпись
1.	Задание на выполнение работы. Формулирование проблемы, цели и задач работы	Планируемая дата		Руководитель ВКР	
2.	1 часть _____	Планируемая дата		Руководитель ВКР	
3.	Утверждение окончательных формулировок решаемой проблемы, цели работы и перечня задач	Планируемая дата		Заведующий кафедрой	
4.	2 часть _____	Планируемая дата		Руководитель ВКР	
5.	3 часть _____	Планируемая дата		Руководитель ВКР	
6.	4 часть _____	Планируемая дата		Руководитель ВКР	
7.	1-я редакция работы	Планируемая дата		Руководитель ВКР	
8.	Подготовка доклада и презентации	Планируемая дата			
9.	Заключение руководителя	Планируемая дата		Руководитель ВКР	
10.	Нормоконтроль	Планируемая дата		Нормоконтролер	
11.	Внешняя рецензия	Планируемая дата			
12.	Защита работы на ГЭК	Планируемая дата			

Студент \_\_\_\_\_  
 (подпись, дата)

Руководитель работы \_\_\_\_\_  
 (подпись, дата)

## **РЕФЕРАТ**

Расчетно-пояснительная записка 63 с., 37 рис., 2 табл., 24 ист., 0 прил.

Объектом разработки является оптимизация планирования грузоперевозок в транспортной системе на основе метода потенциалов.

Целью работы является разработка и реализация модификации метода потенциалов, осуществляющего создание оптимального плана перевозки грузов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** транспортная система, метод потенциалов, задача маршрутизации транспортных средств.

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>8</b>
<b>1 Аналитическая часть</b>	<b>9</b>
1.1 Актуальность проблемы . . . . .	9
1.2 Анализ предметной области . . . . .	10
1.3 Сравнение с аналогами . . . . .	11
1.4 Детализация задачи . . . . .	12
1.5 Допущения и ограничения задачи . . . . .	14
1.6 Формализация задачи . . . . .	16
1.6.1 Описание учитываемых факторов . . . . .	16
1.6.2 Описание математической модели задачи . . . . .	16
1.6.3 Формализация данных . . . . .	17
1.6.4 Формулирование условий решения и ограничений . . . . .	19
1.6.5 Формулирование критерия оптимизации . . . . .	19
1.7 Описания метода решения . . . . .	20
1.7.1 Формирование опорного плана . . . . .	21
1.7.2 Оптимизация плана . . . . .	25
1.7.3 Составление расписания . . . . .	28
<b>2 Конструкторская часть</b>	<b>32</b>
2.1 IDEF0 диаграмма . . . . .	32
2.2 Схемы алгоритмов . . . . .	36
2.3 Схема сущностей транспортной системы . . . . .	43
2.4 Формат входных данных . . . . .	43
2.5 Формат выходных данных . . . . .	44
<b>3 Технологическая часть</b>	<b>45</b>
3.1 Выбор средств программной реализации . . . . .	45
3.2 Используемые библиотеки . . . . .	45
3.3 Интерфейс программы . . . . .	46
3.4 Результаты работы программы . . . . .	48
3.5 Тестирование программы . . . . .	51

<b>4</b>	<b>Исследовательская часть</b>	<b>53</b>
4.1	Постановка задачи . . . . .	53
4.2	Генерация транспортной системы . . . . .	53
4.3	Проведение экспериментов . . . . .	53
4.3.1	Исследование работы алгоритма . . . . .	53
4.3.2	Сравнение плана до и после оптимизации . . . . .	55
4.3.3	Определение ограничений программы . . . . .	56
4.3.4	Выявление закономерностей работы системы . . . . .	57
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>60</b>
	<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b>	<b>61</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно идёт процесс замены интеллектуального труда человека на специализированные программы. Зачастую автоматизации подвергаются лишь отдельные эпизоды работы человека, отличающиеся однотипностью действий, так как они относительно просты в программной реализации и позволяют повысить производительность работника, предоставив ему больше времени для решения более сложных задач.

Примером подобной подзадачи является планирование доставки в профессии логиста. Решение этой проблемы должно учитывать достаточно большое количество факторов. Подобные задачи удаётся решать при помощи программ, так как с использованием математических методов оптимизации они способны принимать наиболее выгодные решения, с точки зрения выделенных критериев, что не всегда способен сделать человек.

Целью данной работы является разработка метода оптимизации планирования грузоперевозок в транспортной системе на основе метода потенциалов.

Выделены следующие задачи:

- провести анализ предметной области, сформулировать критерии оценки оптимальности решений;
- выбрать базовый метод оптимизации и определить направления его модификации;
- формализовать задание, определить необходимый функционал программного обеспечения;
- определить набор необходимых данных и способ их хранения;
- разработать программу в соответствии с выделенным функционалом и протестировать её;
- провести экспериментальную проверку качества работы реализованного метода.



# 1 Аналитическая часть

## 1.1 Актуальность проблемы

В данный момент торговые розничные сети (другое название – ретейл) динамически развиваются и с каждым годом занимают всё большую долю в общем объёме розничной торговли[1]. Деятельность подобных предприятий тесно связана с управлением цепочками поставок (SCM — Supply Chain Management), под которым понимается комплекс подходов, способствующий эффективной интеграции поставщиков, производителей, дистрибьюторов и продавцов, в том числе, в части хранения и перемещения продукции от точки изготовления до точки потребления.. Этот процесс можно разделить на следующие этапы[2].

- 1) Планирование. Принимается решение об управлении жизненным циклом товаров, объёмах производства и закупок.
- 2) Закупки. Происходит управление снабжением, оцениваются и выбираются поставщики.
- 3) Производство. Включает в себя процесс производства, контроль технологических изменений, управление качеством и т.д.
- 4) Доставка. Состоит из трёх основных процессов: управление заказами, управление складом и транспортировка.
- 5) Возврат. На этом этапе определяются элементы возврата товара, составляются графики возврата и направления на уничтожение и переработку.

Среди перечисленных задач выделим отдельно транспортную логистику. Затраты на неё существенны, что обосновывается её сложностью и жизненной важностью для деятельности фирмы.

Таким образом, расширение сегмента розничных сетей на рынке влечёт за собой повышение спроса на перевозку товаров. Большинство транспортных компаний прибегают к использованию программного обеспечения для ускорения и упрощения различных этапов процесса перевозки[3]. Автоматизация дан-

ной работы позволяет повысить её эффективность, в том числе за счёт снижения транспортных издержек. Это должно положительно сказаться на стоимости услуг данной компании, что, в свою очередь, может увеличить спрос на её услуги.

## **1.2 Анализ предметной области**

Задачей транспортной логистики является организация перемещения груза между двумя местами по оптимальному маршруту[4]. В данном случае оптимальным считается тот маршрут, который позволяет перевезти объекты в предусмотренные сроки с наименьшими затратами и вредом для них. Стоит отметить, что зачастую возможные маршруты не являются оптимальными сразу по всем критериям, поэтому приходится принимать компромиссные решения.

Случаи, когда задачи розничной торговли, транспортировки и складирования товара (а иногда даже производства) выполняются одной фирмой достаточно редки и характерны только для крупного бизнеса. Этот подход организации улучшает интеграцию всех перечисленных элементов логистической системы, что способно снизить издержки на каждом из этапов. Малые предприятия не располагают подобными ресурсами и, как правило, пользуются услугами других компаний для выполнения данной функции.

В рамках данной работы рассматривается решение задач автоматического планирования для автомобильной транспортной компании, клиентами которой являются малые и средние ретейл-предприятия.

Логистика малого бизнеса имеет ряд особенностей[5]. Как было отмечено, небольшие торговые организации не способны содержать необходимый штат сотрудников, транспортных средств и т.д., а также не обладают достаточно большим оборотом товаров для собственной организации перевозки. Малые объёмы поставок для каждого отдельного предприятия приводят к тому, что компании-перевозчики совмещают планируют один маршрут сразу через несколько точек доставки.

Можно заключить, что обыкновенный процесс работы фирмы доставки

заключается в следующем. Несколько ретейл-предприятий формируют заказы с указанием заказываемых товаров и их объёмов. Транспортная компания определяет совместные маршруты и средства доставки, формирует заказ для складского предприятия. Назначенные грузовые автомобили загружаются на складе и развозят груз по нужным пунктам, после чего возвращаются на стоянку.

### **1.3 Сравнение с аналогами**

Системы управления перевозками (TMS – Transportation management system), как было отмечено выше, являются востребованными для предприятий, занимающихся логистикой. Данные системы, в основном, решают следующий перечень задач[6]:

- расчет логистических затрат;
- оптимальное использование транспортных средств для минимизации общих расходов;
- повышение качества обслуживания – соблюдение сроков доставки, установленных транспортной службой компании;
- автоматизация процесса транспортного планирования и управления, обеспечивающая решение для конкурентного транспортного планирования и управления;
- повышение производительности труда работников при планировании и организации грузовых перевозок.

В число наиболее популярных в России входят следующие TMS.

- Oracle Transportation Management.
- SAP TM.
- 1С: TMS Логистика. Управление перевозками.

Перечисленные программы позволяют осуществлять составление, расчёт стоимостей, поручение и контроль выполнения плана транспортировок. Также зачастую реализуются различные интерфейсы и функционал для водителей, логистов и прочих работников. Таким образом, общей чертой данных систем яв-

ляется комплексный подход к решению задач транспортной логистики. Предпринимается попытка удовлетворить все потребности, так или иначе связанные с обработкой данных.

Сравнительный анализ основного функционала[6] указанных TMS приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение существующих решений

<b>Функция \ TMS</b>	<b>OTM</b>	<b>SAP</b>	<b>1C</b>
Прогнозирование	да	да	нет
Планирование заказов	да	частично	частично
Распределение перевозок между исполнителями за период	да	да	нет

Среди указанных программ автоматическое планирование с учётом наиболее важных факторов позволяет Oracle TM. В случае других TMS планирование не реализовано настолько детально. Ввиду крайне высокой цены[6] на Oracle Transportation Management и в целом на подобные программы, небольшие транспортные фирмы не могут позволить себе столь высокие расходы. Решением может быть использование представленной в данной работе программы совместно со сравнительно недорогой TMS, решающей другие задачи транспортного управления.

#### **1.4 Детализация задачи**

Требуется разработать метод, выполняющий оптимальную планировку маршрутов доставки заказов от складов до потребителей (ритейл-фирм). Целью создания продукта является определение маршрутов, которые будут наиболее выгодными для компании. Выгода в данном случае заключается во множестве факторов, но в первую очередь под ней подразумевается денежная прибыль.

Целевой пользователь — логист транспортной компании. Для него применение программы нужно для получения рекомендаций по заданию маршрутов в определённый момент времени. После этого работник может проанализировать полученные маршруты, внести в них свои корректировки и заняться последующими этапами своей деятельности (непосредственно организацией грузоперевозок, документооборотом и т.д.).

Исходными данными для работы метода является информация о следующих объектах:

- грузовые машины, входящие в автопарк фирмы;
- перевозимые товары;
- стоянка грузовиков;
- поставщики и потребители товара (в данном случае склады и розничные торговые фирмы);
- пути между вышеописанными пунктами маршрута;
- заказы.

Результатом работы должны стать предлагаемые маршруты. Схематически пример транспортной системы представлен на рисунке 1.1, где стрелками обозначены маршруты, выбранные методом как оптимальные.

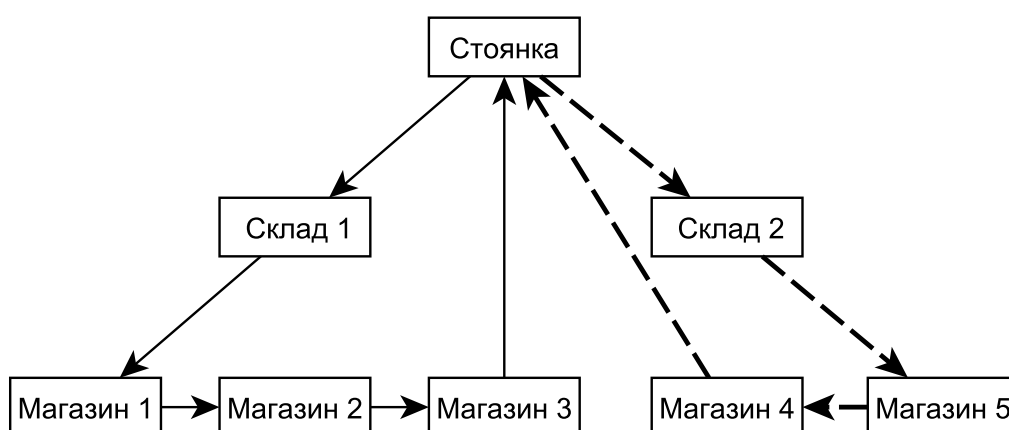


Рисунок 1.1 – Схема модели

## 1.5 Допущения и ограничения задачи

Рассмотрим упомянутые объекты, обозначим допущения и ограничения для задачи.

Одним из главных вопросов является выделение критерия оптимизации, служащего для оценки плана маршрутов. Как было отмечено выше, главным является денежная прибыль, то есть повышение доходов и уменьшение затрат.

Первое достигается только через выполнение большего объёма грузоперевозок. Однако, количество перевозимого груза определяется не при планировании маршрутов перевозки товаров, а при заключении договора между транспортной компанией и ритейл-фирмой. Поэтому, будем считать, что объём и состав заказов фиксирован и их выполнение в срок является обязательным. Это обусловлено большими штрафами за невыполнение договора, как правило существенно превышающими рассмотренные далее затратами. Также при планировании маршрутов нельзя повлиять на объём хранимых товаров, так как это является задачей управления складами.

Деятельность транспортной фирмы связана со множеством статей затрат, но пути перевозки влияют только на время доставки и пробег грузовиков, что в свою очередь отражается на средствах, затрачиваемых на топливо, оплату труда водителя и амортизацию транспортных средств. Для упрощения, будем считать, что этот расход можно вычислить используя длину маршрута и среднюю затрату на километр. Оценка по времени для расчёта стоимости подходит меньше, так как одинаковое время затраченное в пробке и на свободной дороге ведёт к совершенно разным результатам[7].

Путь между пунктами доставки достаточно описать с использованием расстояния и времени. Следует уточнить, что последняя величина является крайне динамичной, ввиду различной загруженности дорог в разные периоды суток, возможностью ДТП и прочих сложно прогнозируемых событий. Поэтому время задаётся усреднённым значением за весь период дня.

В расчёте времени, затрачиваемого на рейс, следует учитывать продолжительность загрузки и выгрузки товаров, а также интервалов между разными заказами. Эти параметры зависят от большого количества факторов. В данной работе время не является целью оптимизации и служит только для задания ограничения. Поэтому данные величины могут быть приняты постоянными.

Таким образом, продолжительность рейса может быть рассчитана как сумма длительности проезда по всем путям и времени погрузки на пунктах складирования и доставки.

Решение проблемы расположения груза в автомобиле и расчёта его вместимости в общем случае является достаточно затруднительным. Так, например, хрупкие вещи могут не допускать размещения другого груза поверх них. В решаемой задаче поставка товаров является оптовой, поэтому прием распространённый в этой сфере подход: все виды товаров поставляются в тарах, которые имеют определённый объём и не требуют специальных условий транспортировки. В таком случае можно считать, что грузовик вмещает такое количество тар, при котором их суммарный объём не превышает объёма заполняемого кузова. В рамках данной задачи в качестве объёма тар устанавливается единственное значение.

Ещё одним допущением является решение о том, что доставка производится однотипными грузовиками, т.е. они все обладают одинаковой вместимостью.

Данное решение обусловлено анализом реальной ситуации в ретейле, который показал, что транспортные фирмы зачастую действительно закупают или арендуют грузовые автомобили одной модели или разных, но со схожими характеристиками. Такой подход позволяет снизить затраты на их содержание и техническое обслуживание. Таким образом, данное упрощение существенно не влияет на применимость метода к реальным системам.

Первым и последним пунктом любого рейса является автостоянка транспортной фирмы, причём в обоих случаях машина не содержит каких-либо грузов. Также будем считать, что в каждом маршруте склад посещается однократ-

но. Данное ограничение позволяет отказаться от длинных рейсов с промежуточными пополнениями.

## **1.6 Формализация задачи**

### **1.6.1 Описание учитываемых факторов**

Сформулированная задача является задачей поиска оптимального решения, а именно транспортной задачей [8]. Она решает проблему составления такого плана перевозок, который будет иметь наименьшие затраты.

В простейшем случае модель транспортной системы может рассматриваться как множество пунктов производства однородного продукта и множество его потребителей. Известны затраты перевозки одной единицы товара для любой пары производителя и потребителя.

Использование такой модели для решения поставленной задачи некорректно, так как она не учитывает следующие факторы.

- Склады и транспортные средства ограничены и обладают конечной вместимостью.
- Рассматриваемый магазин оперирует сразу множеством товаров, которые невзаимозаменяемые.
- Рассматриваются только маршруты "Производитель – Потребитель" тогда как в рассмотренной модели маршрут может проходить сразу через несколько потребителей. Таким образом и перевозимый одним транспортом груз зависит сразу от нескольких потребителей.

Основной способ решения вопроса доставки множества продуктов — условное разбиению поставщиков и потребителей из общих на работающих только с одним продуктом. Таким образом задача сводится к множеству однопродуктовых, но с общим набором рейсов, что накладывает совместные ограничения.

### **1.6.2 Описание математической модели задачи**

Для дальнейшей разработки метода решения поставленной задачи необходимо описать транспортную систему с помощью некой математической мо-



дели. Таким образом учитываемые параметры и ограничения будут формализованы с помощью определенных значений. Так как метод должен составлять маршруты, то в первую очередь стоит формализовать представление формирующих их дорог.

Наилучшим образом подходит представление с помощью неориентированного связанного взвешенного графа, вершинами которого являются пункты маршрута (то есть стоянка, склады или потребители), а рёбрами связывающие их дороги. Весами рёбер будет являться протяжённость соответствующей ему дороги.

Задачу можно сформулировать как поиск такого множества циклов, в котором выполняются следующие требования:

- циклы начинающихся на стоянке транспортной фирмы;
- за каждым циклом закреплена задача перевозки определённого набора товаров некоторому набору потребителей;
- соблюдаются ограничения модели;
- является самым оптимальным среди всех множеств, удовлетворяющих предыдущим требованиям.

### 1.6.3 Формализация данных

Дополним описание математической формализацией данных метода.

#### **Фиксированные величины.**

$Vol$  – объём одной тары,  $Con$  – стоимость топлива (литр / у.е.)

#### **Пункты маршрута и дороги.**

$A_i$  – склады с запасом продукции в  $a_i$ , ( $i = \overline{1, N_a}$ ).  $B_i$  – потребители с потребностью продукции в  $a_i$ , ( $i = \overline{1, N_b}$ ).

Данные об  $A$ ,  $B$  и автостоянке объединяются в понятие пункта маршрута  $P$ , ранее упомянутого при описании графа. Общее количество пунктов опишем как  $N_P = N_b + N_a + 1$ , распределение пунктов следующее:

- $i = 1$  – автостоянка;
- $i = \overline{2, N_a + 1}$  – склады;

- $i = \overline{N_a + 2, N_b + N_a + 1}$  – потребители.

Дороги, связывающие пункты описываются с помощью параметров  $t_{ij} > 0$ ,  $d_{ij} > 0$  – время перемещения и расстояние между  $P_i$  и  $P_j$ .

### **Продукция и её баланс.**

$Prod_i$  – продукт ( $i = \overline{1, N_{prod}}$ ).

$O_i$  — начальный баланс товаров в  $i$ -м пункте.

$O_{ij}$  — баланс продукта  $Prod_j$  в пункте  $P_i$ .

Баланс характеризует дефицит или профицит товаров для определённого пункта. В случае, если пунктом является склад, то за баланс принимается объём запасов. Если это потребитель, то балансом считается заказ со знаком минус. Одним из условий решения задачи является перераспределение продуктов с помощью перевозок таким образом, чтобы во всех пунктах был неотрицательный баланс.

### **Транспорт и рейсы.**

$T_i$  – транспорт с вместимостью в  $c$  (в кубометрах) и затратой топлива в  $f$  (в литр / км) ( $i = \overline{1, N_t}$ ). Как было сказано ранее, в данной задаче все грузовики обладают одинаковыми характеристиками.

Рейсы обозначим как  $R_i$  ( $i = \overline{1, N_R}$ ).  $RT_i = \overline{1, N_t}$  – индекс транспорта, назначенного на  $i$ -й маршрут.

$RP_i$  – вектор пунктов, задействованных в  $i$ -м рейсе.  $RP_i[j]$  – индекс пункта, посещённый в  $j$ -ю очередь на  $i$ -м рейсе, где  $j = \overline{1, N_{RP_i}}$ .

$v_{ijkl} \geq 0$  – количество товара  $Prod_l$  перевезённое  $k$ -м рейсом ( $k = \overline{1, N_R}$ ) между  $P_i$  и  $P_j$ , где  $i \neq j$  и  $i, j = \overline{1, N_P}$ .

$t_{begin}, t_{end}$  обозначим как время начала и завершения рабочего дня.  $t_{load}, t_{wait}$  зададим как время на загрузку/выгрузку товара и перерывом между рейсами.

Вектор  $v$ , состоящий из множества маршрутов и удовлетворяющий ниже идущим условиям и ограничениям считается решением.

#### 1.6.4 Формулирование условий решения и ограничений

План перевозок можно считать решением задачи в случае, если поставки удовлетворили всех потребителей. В принятом обобщении пунктов это можно записать как формулу 1.

$$O_{il} + \sum_{j=1}^{N_P} \sum_{k=1}^{N_t} (v_{jikl} - v_{ijkl}) \geq 0 \quad \forall l = \overline{1, N_{prod}} \quad (1)$$

Сформулируем ограничения модели. Ни на одном из этапов перевозки объём продукта не должен превысить максимальную вместимость транспорта.

$$\sum_{l=1}^{N_{Prod}} v_{ijkl} \cdot Vol \leq c, \quad \forall i, j \in \overline{1, N_P}, k \in \overline{1, N_t} \quad (2)$$

Каждый рейс совершает только одну погрузку на складе.

$$\exists! i : v_{RP_k[i]RP_k[i+1]k} > v_{RP_k[i-1]RP_k[i]k} \quad \forall k \in \overline{1, N_R} \quad (3)$$

Каждый рейс начинается и завершается на стоянке.

$$RP_k[1] = RP_k[N_{RP_k}] = 1 \quad \forall k \in \overline{1, N_R} \quad (4)$$

#### 1.6.5 Формулирование критерия оптимизации

Критерием оптимизации является минимизация затрат. Как было отмечено выше, планирование способно оказывать влияние только на стоимость всех рейсов. Целевая функция принимает следующий вид.

$$L(R) = Con \cdot \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_{RP_i}-1} f \cdot d_{RP_i[j]RP_i[j+1]} \rightarrow \min \quad (5)$$

То есть сумма затрат каждого рейса. Так как было принято, что  $Con$  и  $f$  постоянны и одинаковы для любого транспорта, то критерий оптимизации можно упростить до следующего вида.

$$L(R) = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_{RP_i}-1} d_{RP_i[j]RP_i[j+1]} \rightarrow \min \quad (6)$$

## Итог формализации

Приведём все описанные формализации в математическую модель рассматриваемой задачи поиска оптимального плана поставок.

$$\left\{ \begin{array}{l} L(R) \rightarrow \min \\ O_{il} + \sum_{j=1}^{N_P} \sum_{k=1}^{N_t} (v_{jikl} - v_{ijkl}) \geq 0 \quad \forall l = \overline{1, N_{prod}} \\ \sum_{l=1}^{N_{Prod}} v_{ijkl} \cdot Vol \leq c, \quad \forall i, j \in \overline{1, N_P}, k \in \overline{1, N_t} \\ \exists! i : v_{RP_k[i]RP_k[i+1]k} > v_{RP_k[i-1]RP_k[i]k} \quad \forall k \in \overline{1, N_R} \\ RP_k[1] = RP_k[N_{RP_k}] = 1 \quad \forall k \in \overline{1, N_R} \end{array} \right. \quad (7)$$

### 1.7 Описание метода решения

Учитывая перечисленные факторы, в качестве основы для решения сформулированной задачи возможно выбрать метод потенциалов в сетевой постановке[9]. Он является модификацией симплекс-метода, применяющегося для многих оптимизационных задач, в том числе и классической транспортной задачи[10].

Преимуществом такого метода является то, что он может быть модифицирован для прокладывания транзитных маршрутов и добавления ограничений на пропускную способность, что необходимо в рамках созданной математической модели.

Метод решения поставленной задачи состоит из следующих трёх этапов.

- 1) Формирование опорного (начального) плана перевозок. Он соблюдает все поставленные ограничения, но не является оптимальным. Служит входным планом для первой итерации следующего этапа.
- 2) Оптимизация плана. Производится итерационное изменение составленного плана с помощью метода потенциалов до тех пор, пока не будет достигнут план, при котором станет невозможно перестроение с меньшим значением критерия.

### 3) Заключительный. Составление расписания для сформированного набора маршрутов.

Рассмотрим эти этапы подробнее.

#### **1.7.1 Формирование опорного плана**

В первую очередь формируется опорный план перевозок. В неё соблюдаются все ограничения модели, но при этом он не является оптимальным.

Для формирования начальных маршрутов существует метод северо-западного угла и метод минимального элемента[14]. Фактически данные методы различаются лишь порядком выбора путей между пунктами для формирования маршрутов. Для данной задачи будем использовать последний, так как он эффективнее [15] за счёт изначального учёта не только запасов и потребностей, но и протяжённости перевозок.

Идея метода минимального элемента заключается в последовательном назначении маршрутов от поставщика к потребителю до полного удовлетворения потребности последних. Выбор осуществляется в порядке возрастания протяжённости дорог. По выбранному пути назначается перевозка на максимально возможное количество товаров (ограничивается наличием на складе, потребностью заказчика и вместительностью транспорта). Грузовики выбираются по принципу минимального использования в уже созданных рейсах. После этого из рассмотрения удаляются склады и магазины без запасов и потребностей соответственно. Описанный шаг повторяется до тех пор, пока все потребители не будут удовлетворены.

В случае, если после рассмотрения всех рёбер остаются потребители с неудовлетворёнными заказами, для каждого из них строятся кратчайшие маршруты до складов с помощью алгоритма Дейкстры[11]. После этого вышеописанный алгоритм повторяется для них ещё раз.

Как было отмечено ранее, решаемая задача имеет ряд нюансов. Рассмотрим какое влияние они оказывают на данном этапе.

- Ограничения по времени выполнения заказов в начальном плане не учи-

тываются. Они являются задачей дальнейшей оптимизации.

- Транзитные маршруты на данном этапе могут быть проложены в случае, если в между пунктами не задано прямой дороги.
- Многопродуктовость[12]. По очередному выбранному пути перевозится максимальное количество каждого товара.
- Ограничение по вместимости. В случае превышения объёма перевозимых товаров вместимости грузовика, на рассматриваемый рейс назначается только часть тар, а остальные откладываются на дополнительный рейс по тому же маршруту (он также может быть разбит на части по тому же принципу). На текущий рейс товары должны назначаться так, чтобы максимально заполнить грузовик, при этом постараться избежать разбиения доставки однотипных товаров по разным маршрутам. Это нужно для эффективности использования транспорта и удобства оптимизации на следующем шаге. Данное описание подходит под формулировку задачи о рюкзаке[13], поэтому размещение товаров будет производится по этому алгоритму.

С учётом описанных нюансов, метод можно описать следующим образом. Для каждого пункта  $P_i$ , являющегося потребителем составляется множество дорог  $Roads_i$  до пунктов, являющихся складами и имеющими одинаковые товары в запасах и заказах.

$$Roads_i = \{d_{ij} | \left\{ \begin{array}{l} j = \overline{2, N_a + 1} \\ \exists l : O_{il} \neq 0, O_{jl} \neq 0 \end{array} \right\} \} \quad (8)$$

Среди всех множеств  $Roads_i$  выбирается наименьший элемент  $d_{ij}$ , после чего создаётся новый маршрут  $R_k$ , с  $v_{ijkl} = \min(-O_{il}, O_{jl})$ . После этого  $d_{ij}$  исключается из  $Roads_i$  и выбор переходит к маршруту.

Рассмотрим пример работы алгоритма минимального элемента. Пусть задана система, обозначенная на рисунке 1.2. Пунктирными линиями обозначены существующие дороги и расстояния.

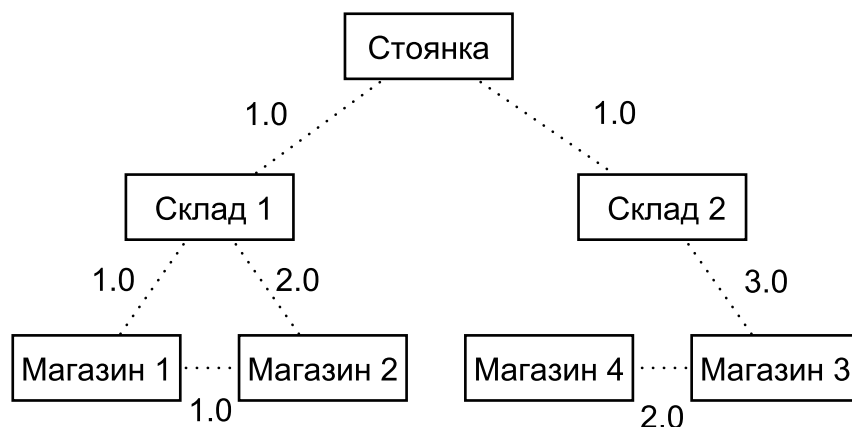


Рисунок 1.2 – Начальное состояние системы

Пусть баланс задан таблицей 2, объём тары  $1.0m^3$ , вместимость грузовика  $10.0m^3$ .

Таблица 2 – Начальный баланс системы

Пункт \ Продукт	Продукт	
	А	В
Стоянка	0	0
Склад 1	+10	+10
Склад 2	+10	+10
Магазин 1	−8	−3
Магазин 2	−2	−2
Магазин 3	0	−4
Магазин 4	−4	0

После обработки всех рёбер между магазинами и стоянками для системы будут составлены маршруты, обозначенные на рисунке 1.3 с помощью стрелок. Порядок их назначения будет следующим:

- 1) Кратчайший путь Склад 1 -> Магазин 1. Для него назначается перевозка 8 тар товара А и 2 тары Б. Для оставшейся тары продукта Б выделяется ещё один рейс по этому же маршруту. Заказ магазина 1 выполнен, он

исключается из рассмотрения.

- 2) Следующий кратчайший путь Склад 1 -> Магазин 2. Назначается перевозка 2 тар продукта А и В.
- 3) Последний путь Склад 2 -> Магазин 3. Назначается перевозка 4 тар продукта В.

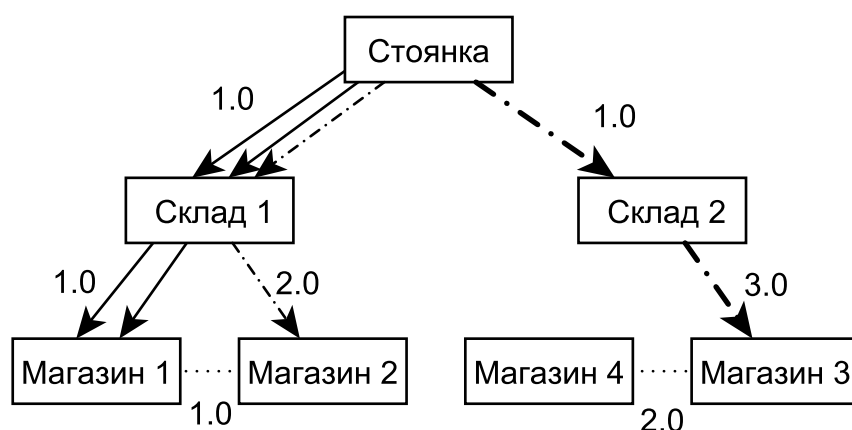


Рисунок 1.3 – Начальное задания маршрутов

Так как остался Магазин 4 с неудовлетворённым заказом, из-за невозможности удовлетворить его потребностями непосредственно связанными с ним складами, для него осуществляется поиск расстояний до всех складов. Склад 2 расположен на расстоянии 5.0, склад 1 – 7.0. Второй ближе, следовательно из него назначается перевозка на 4 тары продукта А. После этого потребности всех магазинов удовлетворены. Состояние системы после окончания предварительного этапа изображено на рисунке 1.4

Если оценить состояние грузовиков, то можно отметить неоптимальность созданного плана. Грузоперевозку в магазин 2 можно осуществить на 2-м рейсе, так как в машина загружена неполностью, а удлинение маршрута будет дешевле назначения отдельного рейса. Аналогично совмещается грузоперевозка в 3 и 4 магазины. Поэтому созданный план требует дополнительную обработку.



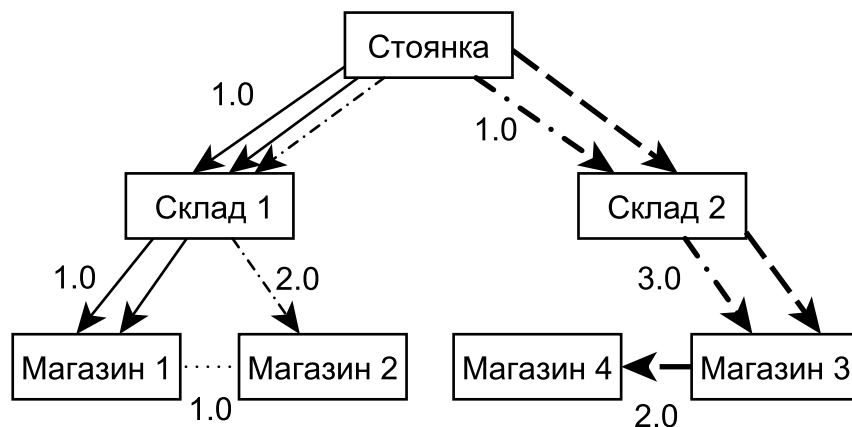


Рисунок 1.4 – Система после дополнительного задания маршрутов

### 1.7.2 Оптимизация плана

Основу алгоритма составляет метод потенциалов. Его целью является нахождение оптимального плана[16]. Действие заключается в следующем.

Каждый узел обладает некоторым значением потенциала  $Pot[P]$ . Оно отражает значение целевой функции для определённого пункта. Изначально оно задаётся в соответствии с сформированным на первом шаге плане перевозок. Значение складов устанавливается как длительность проезда до стоянки. Значения для магазина  $Pot[P_j]$  считается как  $Pot[P_j] = Pot[P_i] + Cost_{ij}$ , где  $Pot[P_i]$  - потенциал пункта, из которого по плану осуществляется доставка груза,  $Cost_{ij} = d_{ij}$  - стоимость перевозки груза по дуге  $ij$ .

Оптимизация производится за счёт рассмотрения альтернативных путей доставки груза в пункт вместо уже запланированных. Это делается при помощи определения значения невязки для каждой дуги. Для пути  $P[i] \rightarrow P[j]$  оно вычисляется как  $Pot[P_i] + Cost_{ij} - Pot[P_j]$ . В случае, если данная величина отрицательна это фактически означает, что существует более выгодный маршрут перевозки. Производится пересчёт потенциалов и всех невязок. В случае, если все невязки положительны считается, что оптимальное решение найдено. Иначе, выбирается самая значительная невязка и для неё повторяется описанный

шаг.

Обратимся снова к выделенным дополнительным условиям задачи.

- Потенциал пункта зависит от рассматриваемого маршрута.

Например, через один пункт может пролегать два маршрута. Стоимость доставки товара в первом является минимальной, если идёт по кратчайшему пути от нужного склада. Во втором она выше, так как до этого посещаются другие пункты. Значения потенциалов получаются разными, поэтому следует выбирать максимальных из них.

- Невязка дуги должна отражать то, что при замене доставки в данный пункт по иному маршруту, старый маршрут может перестать существовать.

Невязка должна высчитываться как  $-Pot[P_j] + Cost_{ij}$ . Данная величина равна изменению целевой функции в случае продления маршрута, идущего через  $P_i$ , и удаление через  $P_j$ .

- Значение потенциала также зависит и от рассматриваемого продукта.

Если в пункт не ведёт ни один маршрут, который перевозит или потенциально может перевести некий продукт, то значение потенциала для данного продукта будет бесконечным. Поэтому для каждого товара рассчитываются собственные значения потенциалов. Значение невязки дуги считается минимальным среди невязок по всем продуктам.

Учитывая перечисленные нюансы следует скорректировать метод.

Отрицательная невязка означает, что для данного пункта, вероятно, возможна более выгодная перевозка взамен существующей. Следует осуществить проверку на соблюдение условий вместимости, наличия достаточного количества товара новом складе и т.д.. Поэтому при обнаружении отрицательной невязки оптимизируемый пункт лишь планируется к дальнейшему рассмотрению.

После подсчёта потенциалов начинается анализ пунктов, к которым ведут дуги с отрицательной невязкой. Рассмотрение производится в порядке возрас-

тания невязок.

При рассмотрении пункта составляется список всех маршрутов, которые могут пройти через дуги с невязкой. Альтернативные маршруты удлиняются до пункта и берут на себя максимальный объём продукции, который позволяет вместимость их транспорта и запасы на складе[17]. Маршруты должны рассматриваться в порядке минимальной стоимости перевозки по ним продукции до данного пункта. Данную величину для  $k$ -го маршрута можно вычислить как  $Cost_{ij} \cdot [Vol \cdot \max_{1 \leq i, j \leq N} (\sum_{l=1}^{N_{Prod}} v_{ijkl})]$ . Поэтому, маршруты без свободного места рассматриваться не будут вне зависимости от их близости к пункту[18].

На рисунке 1.5 представлен пример расчёта потенциалов и невязок для системы с опорным планом, описным ранее на рисунке 1.4. Штрихпунктирными стрелками указаны невязки между смежными пунктами.

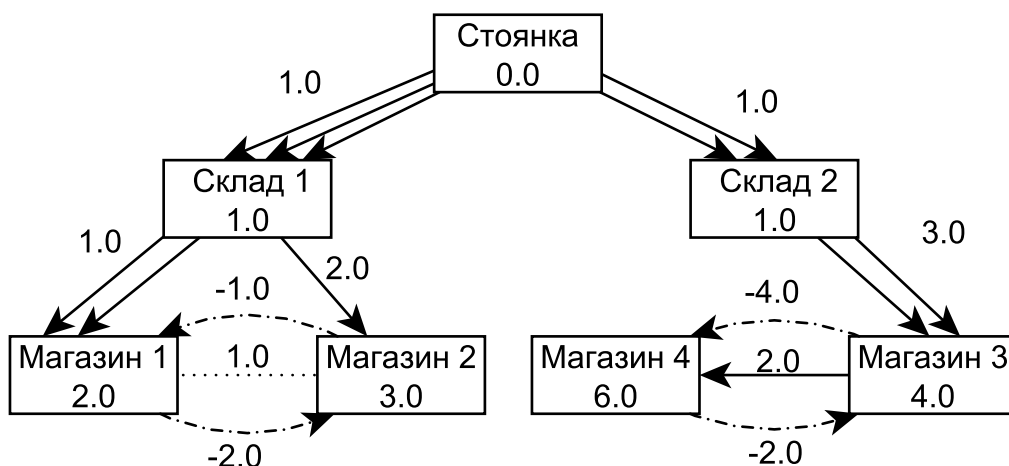


Рисунок 1.5 – Вычисление потенциалов и невязок

В первую очередь будет рассмотрена оптимизация маршрутов, ведущих в «Магазин 4», так как она имеет минимальную невязку равную  $-4.0$ .

Когда вся продукция рассматриваемого маршрута была перераспределена на другие находится значение функции оптимизации  $L$  и сравнивается с исходным. Если новое значение ниже, значит новые маршруты более оптимальные, чем старые. Они принимаются за исходный план и процесс оптимизации пере-

ходит к следующей итерации.

Таким образом, план маршрутов из описанного примера примет вид, изображённый на рисунке 1.6.

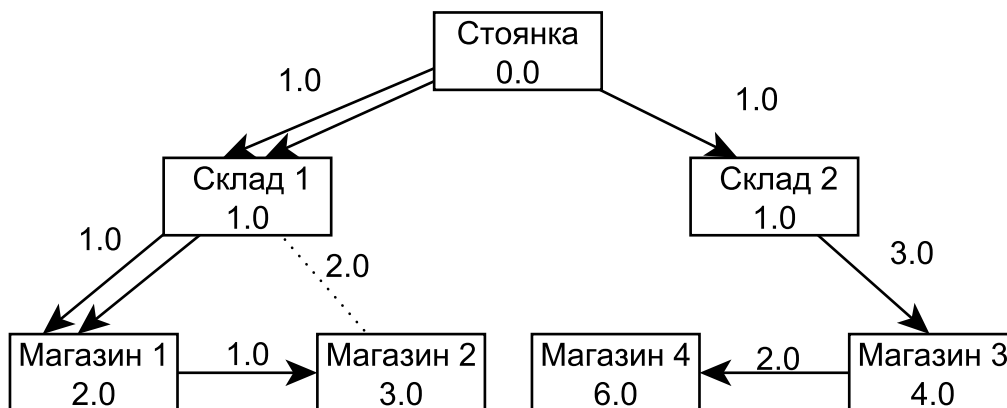


Рисунок 1.6 – Результат работы метода потенциалов

В первую очередь будет продлён маршрут из «Магазина 3» в «Магазин 4». После пересчёта потенциалов останутся невязки между магазинами 1 и 2. Первой будет рассмотрена невязка из «Магазин 1» в «Магазин 2», так как она меньше, что также приведёт к удлинению одного маршрута и удаления другого.

### 1.7.3 Составление расписания

После формирования оптимальных маршрутов перевозок для завершения планирования остаётся решить задачу назначения транспорта на каждый маршрут, а также выбора времени каждой перевозки. Составление расписания должно руководствоваться следующими соображениями.

- Время завершения каждого маршрута не должно превосходить время окончания рабочего дня водителей.
- Один транспорт не может одновременно находиться сразу на нескольких маршрутах.
- При составлении плана желательно избегать ситуаций, когда несколько машин одновременно будут грузиться на одной и той же точке маршрута.

Это обусловлено тем, что в таком случае нельзя гарантировать, что время обслуживания грузчиками двух и более грузовиков, оказавшихся в одном месте останется неизменным ввиду возможного падения скорости погрузки.

Данная задача может быть решена с использованием метода интервалов [19], где пункты погрузки рассматриваются как ресурсы, которые могут быть использованы одновременно только в одном интервале. Действие метода заключается в следующем.

Изначально для каждого маршрута рассчитывается время прибытия и отбытия для каждого пункта. У всех маршрутов на этом этапе время начала принимается минимальным возможным, то есть временем начала рабочего дня  $t_{begin}$ .

На одну из машин назначается произвольный маршрут. Время начала и завершения фиксируются в расписании. Выбор маршрута влияет на дальнейшее составление расписания, и может оказаться не самым оптимальным по критерию времени завершения последнего рейса. Но также не стоит и задачи оптимизации по этому параметру – он должен не превосходить  $t_{end}$ . В случае, если в результате планирования это условие не выполняется, метод будет использован заново, но с иным выбором первого маршрута.

Пример подобного расписания приведён на рисунке 1.7. Допустим, что в данной транспортной системе имеется три транспортных средства. Пунктирными линиями обозначаются маршруты, не закреплённые в расписании.

	9:00	9:15	9:30	9:45	10:00	10:15	10:30	10:45	11:00	11:15	11:30	11:45
Маршрут 1		Склад 1		Магазин 1								
Маршрут 2		Склад 1		Магазин 2								
Маршрут 3		Склад 2		Магазин 1								
Маршрут 4		Склад 2		Магазин 2								

Рисунок 1.7 – Начальное состояние расписания

Далее просматривается список нераспределённых маршрутов. Из него

выбирается маршрут с минимальным временем начала. Он сравнивается с маршрутами из расписания на предмет наличия коллизий – пересечения интервалов погрузки на одинаковых пунктах. В случае, если таковых не найдено, он помещается в расписание с фиксированием транспорта и временем посещения пунктов.

Если коллизия найдена, то высчитывается величина пересечения — интервал времени, в который оба маршрута обслуживаются на одном пункте. Время начала рассматриваемого маршрута увеличивается на величину пересечения, после чего он возвращается в список нераспределенных маршрутов.

Действие повторяется до тех пор, пока все маршруты не окажутся в расписании.

Результатом сравнения всех маршрутов из ранее приведённого примера станет расписание, описываемое рисунком 1.8. Второй и третий маршрут имели коллизии с первым, поэтому были смещены. Четвёртый маршрут не был смещён, также он является самым ранним, поэтому закрепляется в расписании.

	9:00	9:15	9:30	9:45	10:00	10:15	10:30	10:45	11:00	11:15	11:30	11:45
Маршрут 1		Склад 1		Магазин 1								
Маршрут 2				Склад 1		Магазин 2						
Маршрут 3				Склад 2		Магазин 1						
Маршрут 4		Склад 2		Магазин 2								

Рисунок 1.8 – Расписание после первой итерации метода

При очередном просмотре смещается второй маршрут из-за коллизии с четвёртым. Расписание принимает вид, указанный на рисунке 1.9.

	9:00	9:15	9:30	9:45	10:00	10:15	10:30	10:45	11:00	11:15	11:30	11:45
Маршрут 1		Склад 1		Магазин 1								
Маршрут 2				Склад 1		Магазин 2						
Маршрут 3				Склад 2		Магазин 1						
Маршрут 4		Склад 2		Магазин 2								

Рисунок 1.9 – Расписание после второй итерации метода

Последний незакреплённый маршрут не имеет коллизий. Но так как в данном примере только три транспортных средства, второй маршрут смещается так, чтобы его начало совпало с временем освобождения транспорта. Конечное расписание приведено на рисунке 1.10.

	9:00	9:15	9:30	9:45	10:00	10:15	10:30	10:45	11:00	11:15	11:30	11:45
Маршрут 1		Склад 1		Магазин 1								
Маршрут 2				Склад 1		Магазин 2						
Маршрут 3				Склад 2		Магазин 1						
Маршрут 4		Склад 2		Магазин 2								

Рисунок 1.10 – Итоговое расписание

## Вывод

Результатом аналитической части стала формализация поставленной задачи и описание метода её решения.

Была проанализированна предметная область задачи. Проведён сравнительный анализ с наиболее известными решениями, обозначены их преимущества и недостатки. Выявлены основные особенности транспортировки товаров для малого бизнеса.

На основании проведённого анализа были установлены цели создания метода. Описаны объекты модели, входные и выходные данные. Установлены допущения и ограничения для моделируемых объектов, основанные на особенностях рассматриваемого вида грузоперевозки. Также был описан критерий оптимизации маршрутов доставки.

Была разработана математическая модель исследуемой системы. Обоснован выбор метода оптимизации, приведено его описание. Выделены этапы, описаны способы обработки дополнительных учитываемых факторов.

## 2 Конструкторская часть

### 2.1 IDEF0 диаграмма

На рисунках 2.1 – 2.5 представлена IDEF0 диаграмма.



Рисунок 2.1 – IDEF0, контекстная диаграмма A0

Метод состоит из нескольких этапов, описанных на рисунке 2.2. В первую строится опорный план грузоперевозок по модифицированному методу минимального элемента. Далее для него применяется также изменённый под условия решаемой задачи метод потенциалов. Результатом конечного числа итераций данного метода становится оптимальный набор маршрутов перевозки. По нему составляется расписание с использованием метода интервалов.

Метод минимальных элементов описан с помощью диаграммы на рисунке 2.3. Этот метод можно разделить на три действия. В первую очередь рассчитываются кратчайшие расстояния пунктов с помощью алгоритма Дейкстры. Далее



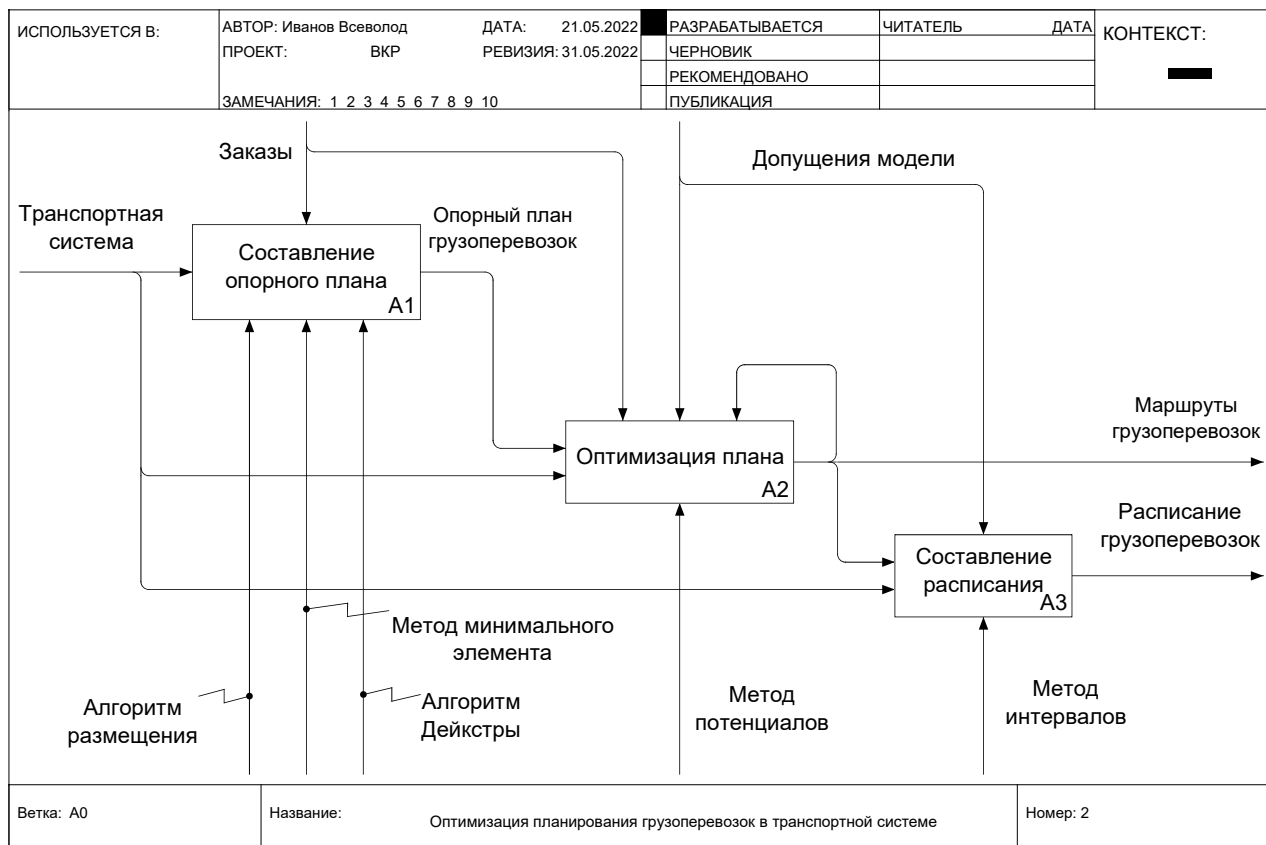


Рисунок 2.2 – IDEF0 диаграмма, декомпозиция A0

создаётся список всех маршрутов до каждого потребителя от стоянки через ближайшие склады. Последним этапом производится основное действие метода — на маршруты в порядке возрастания их стоимости распределяется максимальное возможное количество грузов.

Итогом этапа является опорный план грузоперевозок.

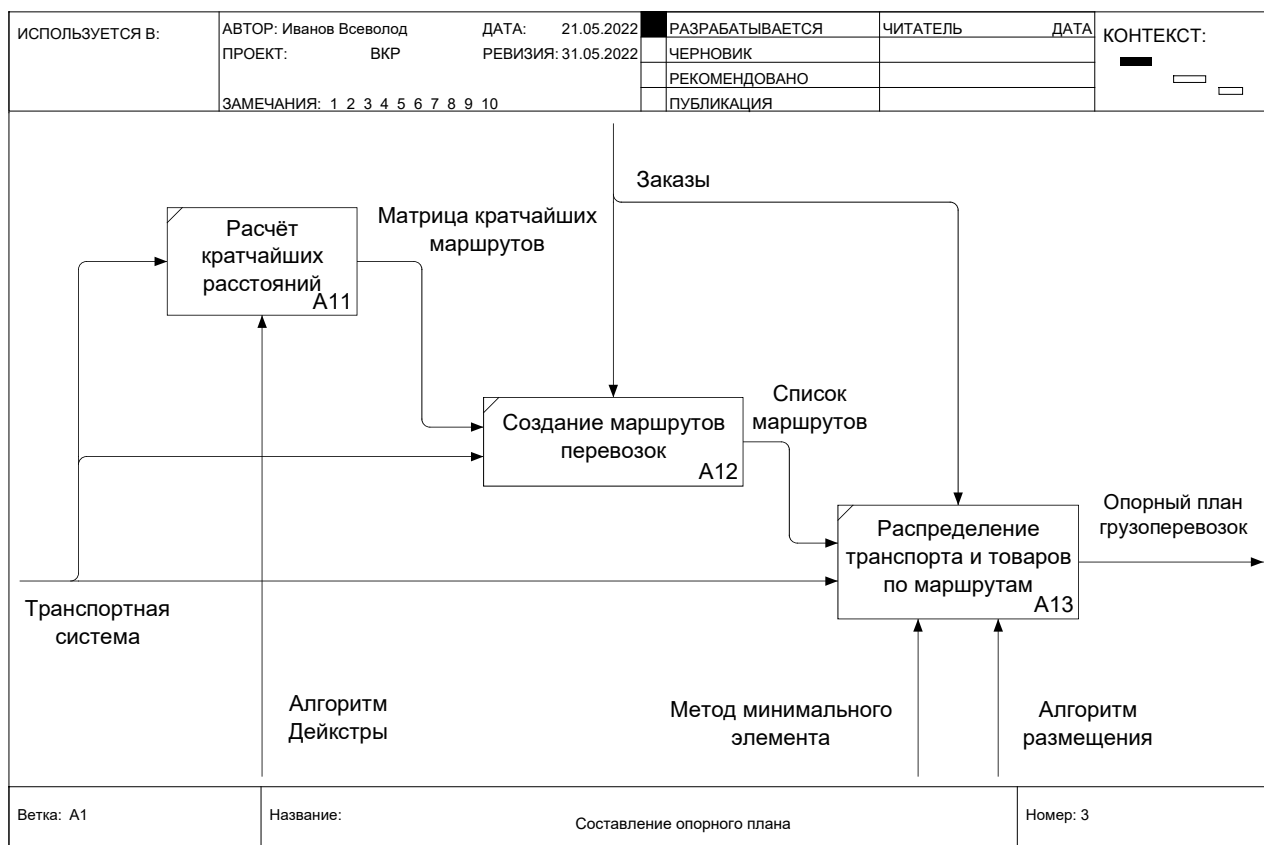


Рисунок 2.3 – IDEF0 диаграмма, декомпозиция A1

Следующий этап выполняет задачу оптимизации плана перевозки и разделяется на четыре шага, изображённых на рисунке 2.4.

- 1) Вычисление потенциалов осуществляется отдельно для каждого продукта по опорному плану. Результатом шага является матрица потенциалов — значения стоимости доставки для каждого пункта по каждому товару.
- 2) Вычисление невязок производится путём сравнения значения потенциалов в соседних пунктах. Полученные величины сохраняются в список.
- 3) Производится рассмотрение всех невязок в порядке возрастания их величин. Изменением маршрутов формируется новый план.
- 4) В следующем этапе полученный план сравнивается с опорным по функции стоимости. В случае её уменьшения создаётся новый опорный план и осуществляется новая итерация метода.

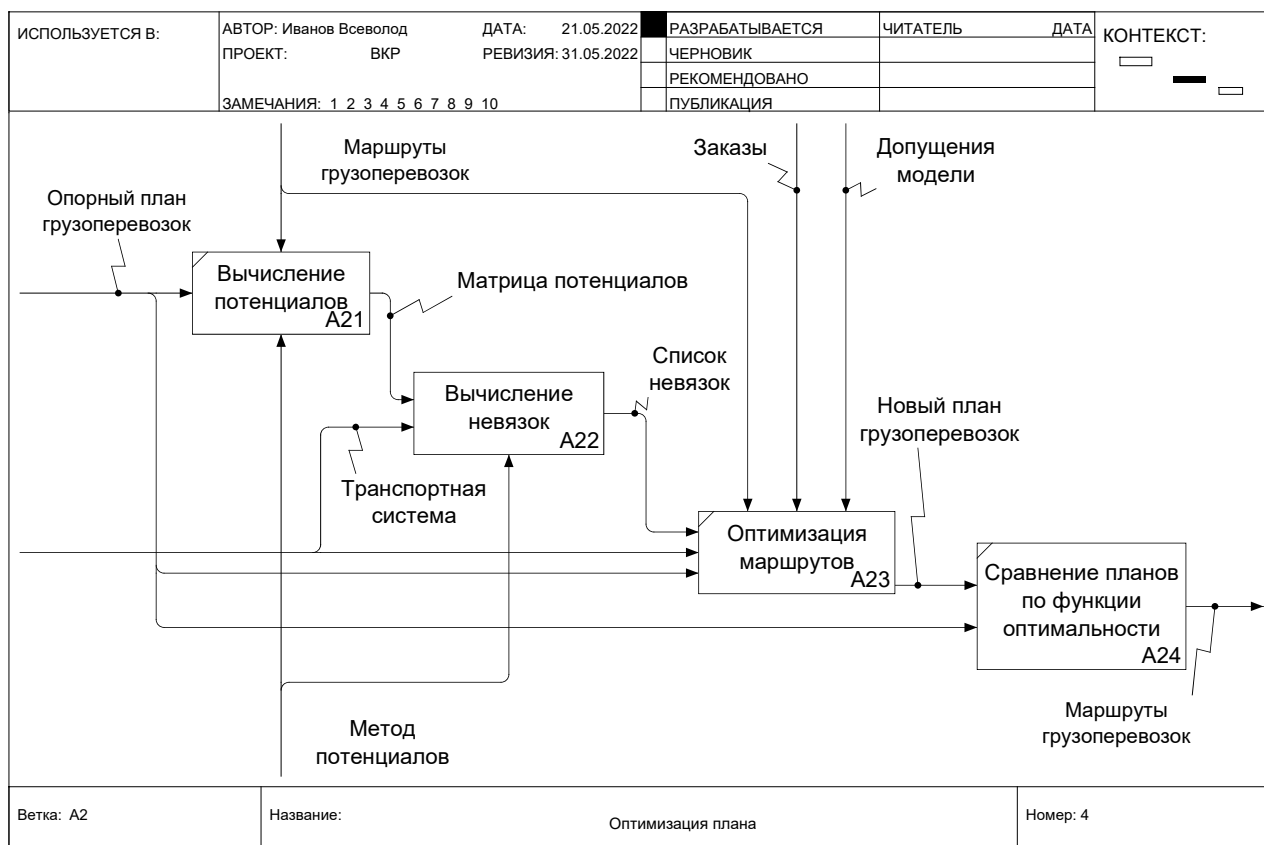


Рисунок 2.4 – IDEF0 диаграмма, декомпозиция A2

В заключающем этапе формируется расписание. Для каждого маршрута подбирается время его начала, чтобы избежать одновременного обслуживания а пунктах вместе с другими маршрутами. Рисунок IDEF0-диаграммы описанного шага приведён на рисунке 2.5.

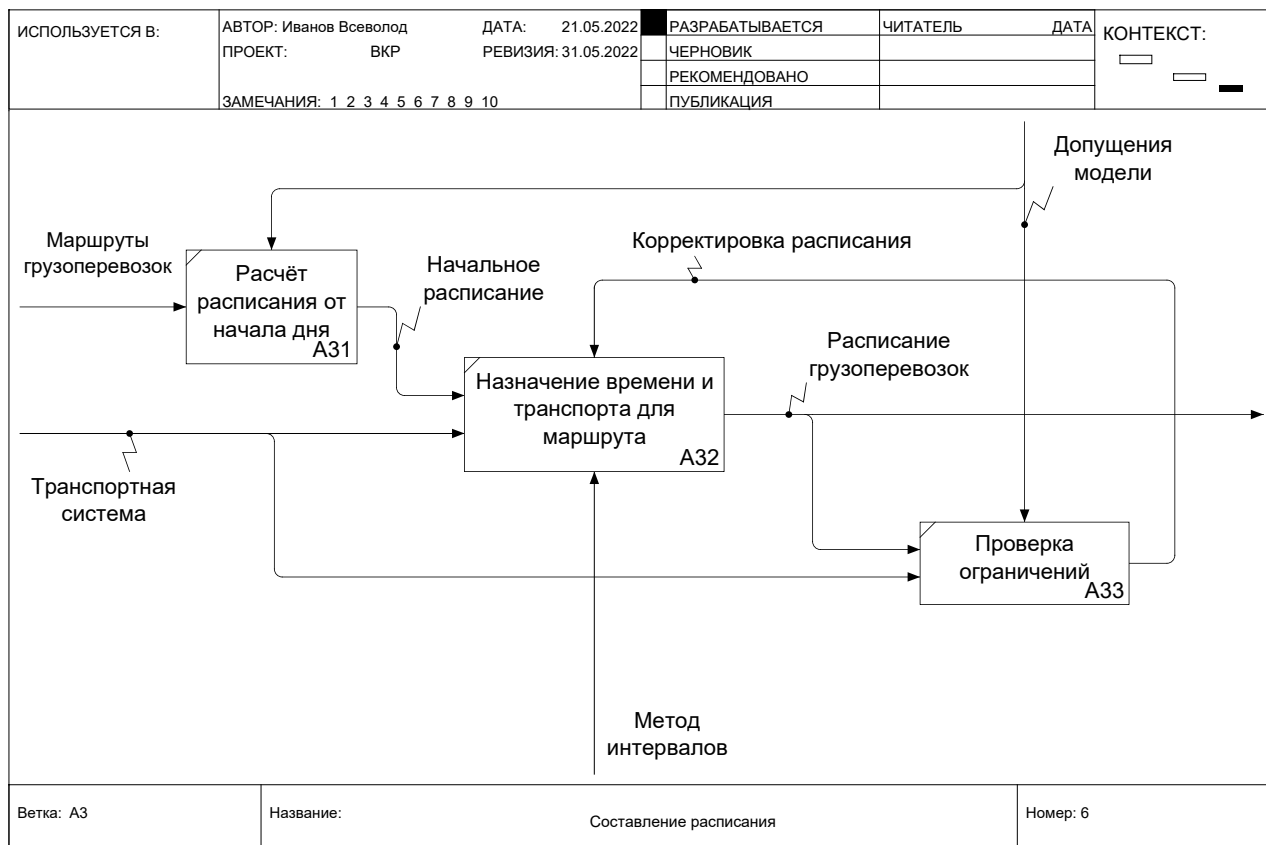


Рисунок 2.5 – IDEF0 диаграмма, декомпозиция A3

## 2.2 Схемы алгоритмов

### Основной алгоритм

Алгоритм оптимизации изображён на рисунке 2.6. В нём можно выделить следующие основные этапы:

- 1) Вычисление начального баланса продуктов.
- 2) Составление опорного плана.
- 3) Оптимизация плана.
- 4) Формирование расписания.

Рассмотрим упомянутые этапы подробнее в следующих схемах.

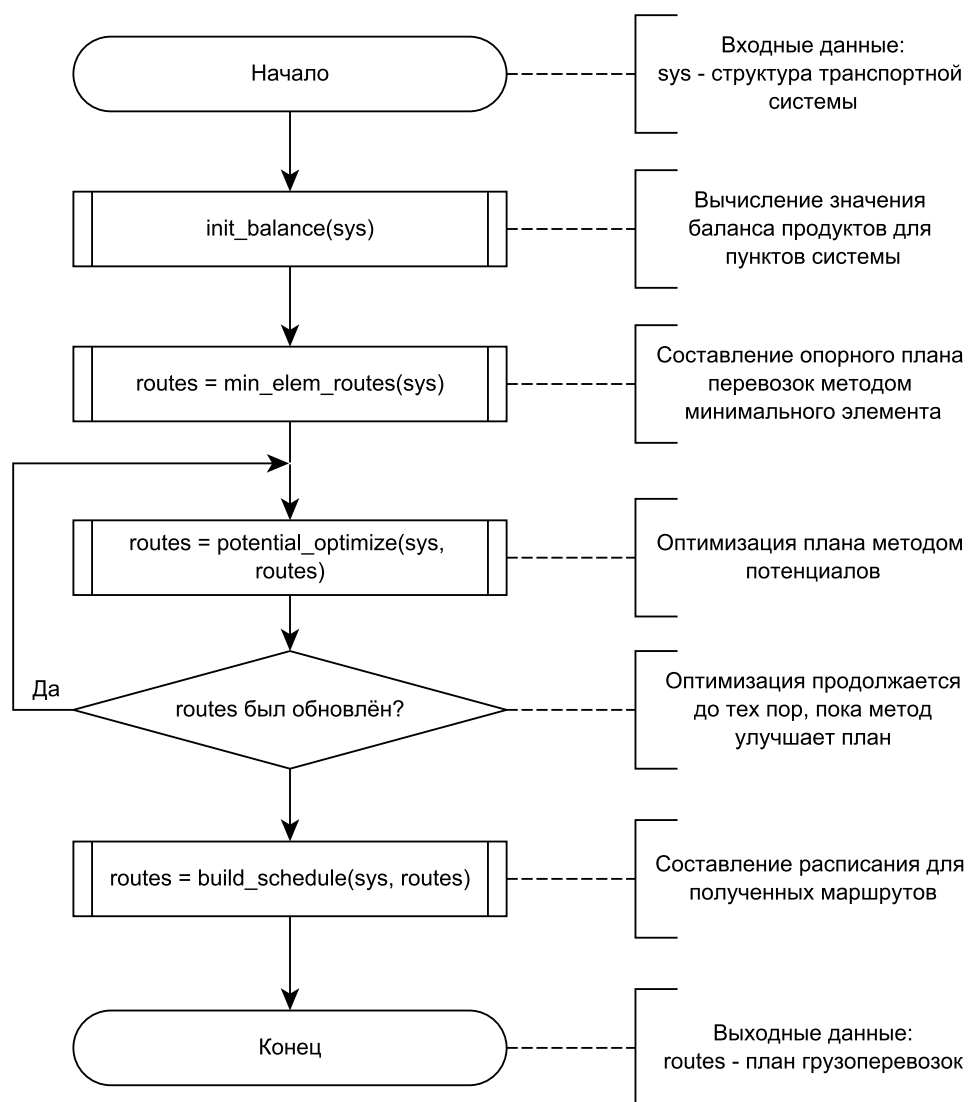


Рисунок 2.6 – Схема общего алгоритма программы

### Вычисление начального баланса

При выполнении алгоритма вычисления баланса, схема которого изображена на рисунке 2.7, для всех складов значение выставляется как количество хранимой продукции, для всех потребителей число заказанных тар продуктов со знаком минус. Баланс стоянки нулевой. Данный этап нужен для проверки соблюдения ограничения количества продукции в различных пунктах.

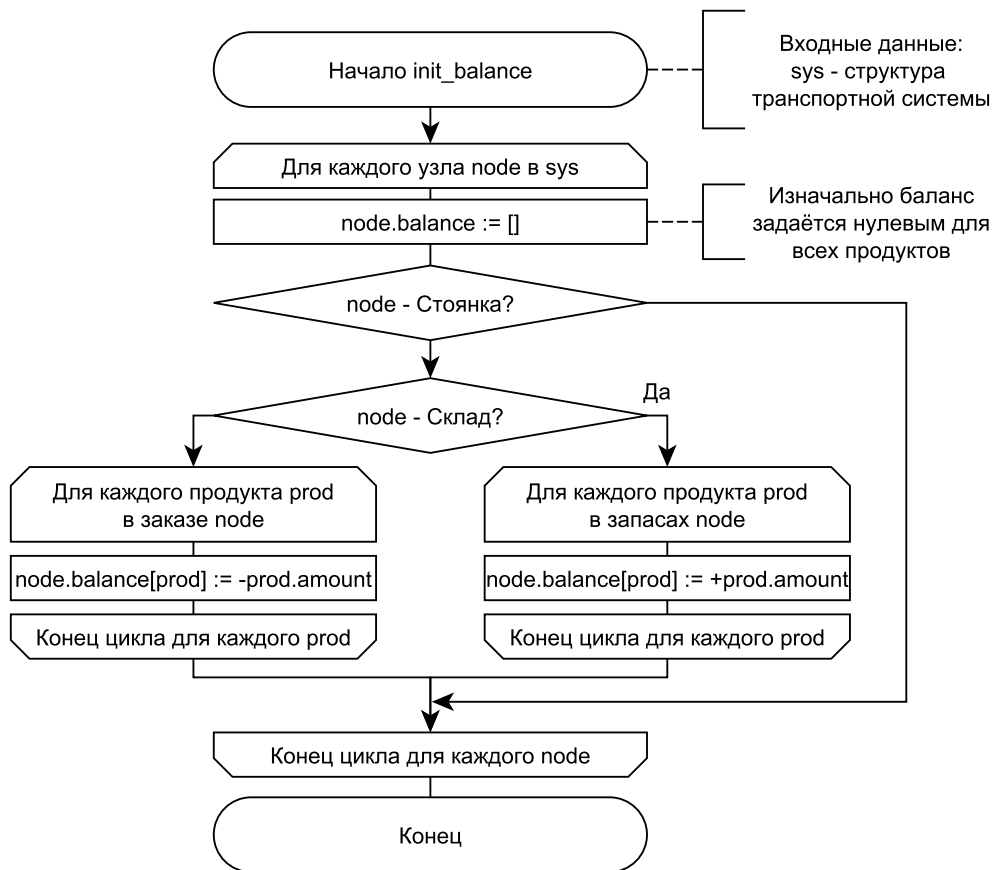


Рисунок 2.7 – Схема алгоритма вычисления начального баланса

### Составление опорного плана

На этом этапе формируется опорный план грузоперевозки. Для этого все маршруты, ведущие к каждому потребителю через склад по вычисленному кратчайшему пути, просматриваются в соответствии с методом минимального элемента — в порядке возрастания их стоимости. Схема данного алгоритма приведена на рисунке 2.8.

### Оптимизация плана

Рисунки 2.9 - 2.10 описывают алгоритм оптимизации плана. После вычисления потенциалов начинается рассмотрение узлов, для которых обнаружены отрицательные невязки. Анализируется возможность замены перевозки текущих маршрутов альтернативными, завершающимися на смежных пунктах. Другие маршруты продлеваются по очереди убывания их выгодности для дан-

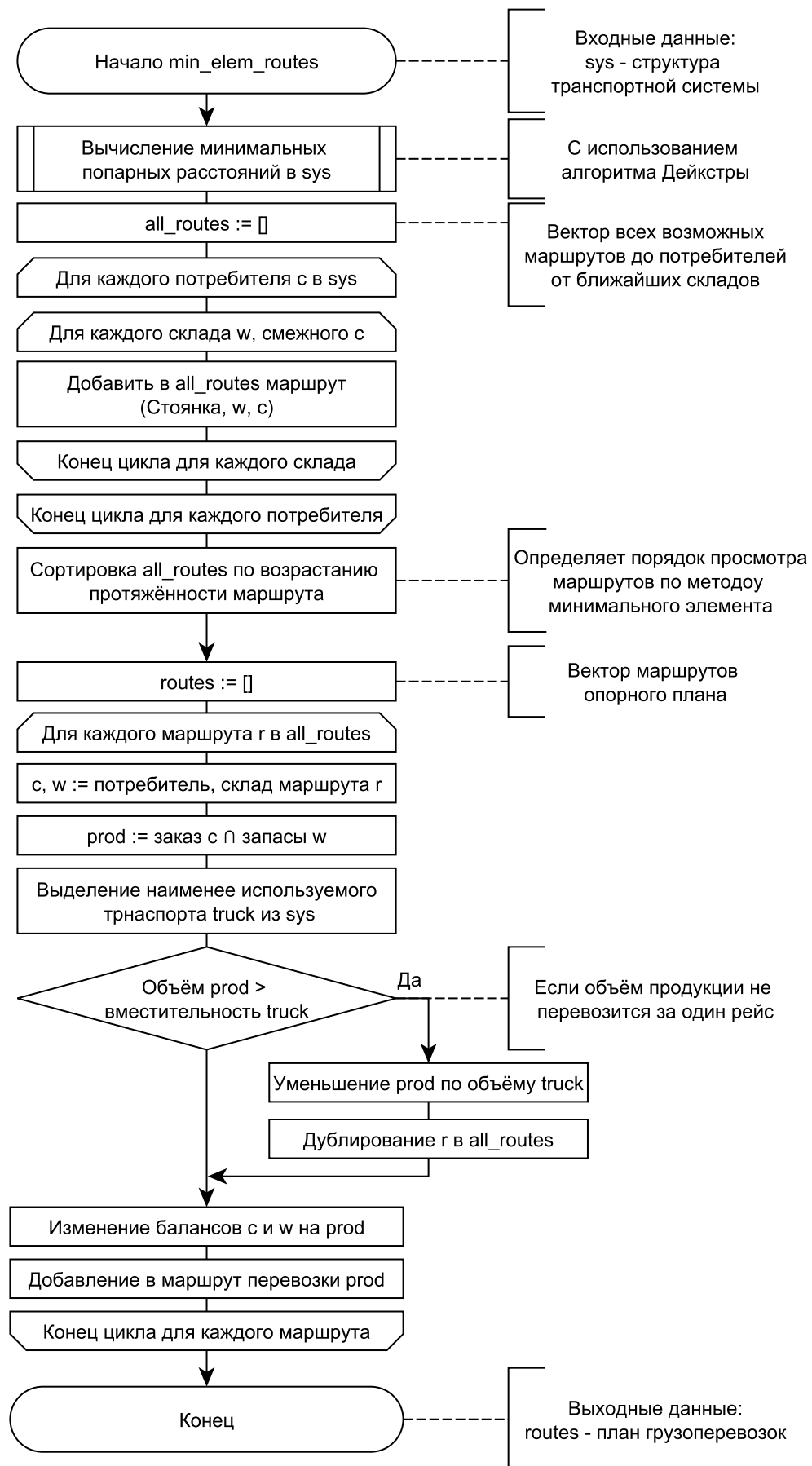


Рисунок 2.8 – Схема алгоритма минимального элемента

ного пункта и по мере ограничений.

Если после замены оригинального маршрута в данном пункте функция стоимости для плана становится меньше, то изменения принимаются за новый опорный план. Иначе, поиск путей оптимизации продолжается далее.

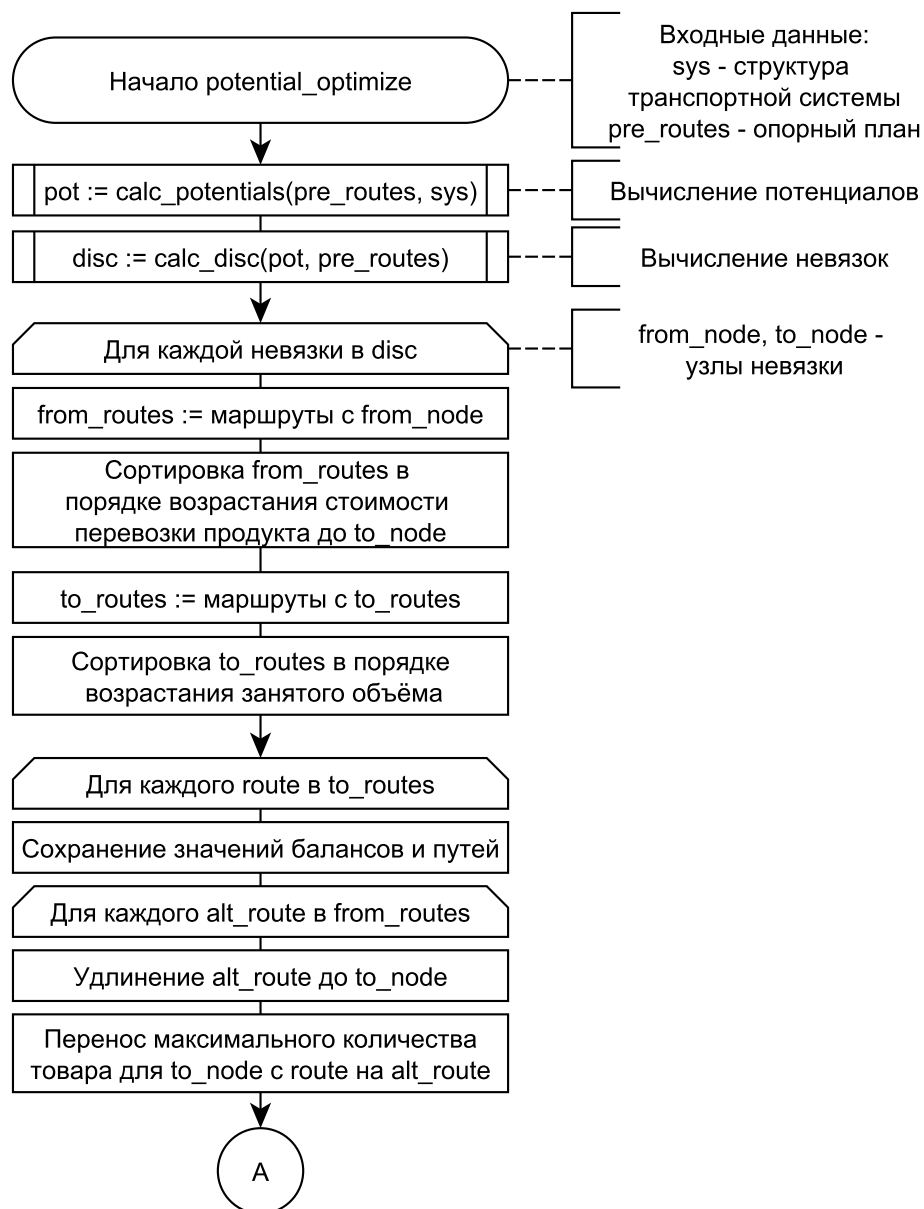


Рисунок 2.9 – Схема алгоритма оптимизации



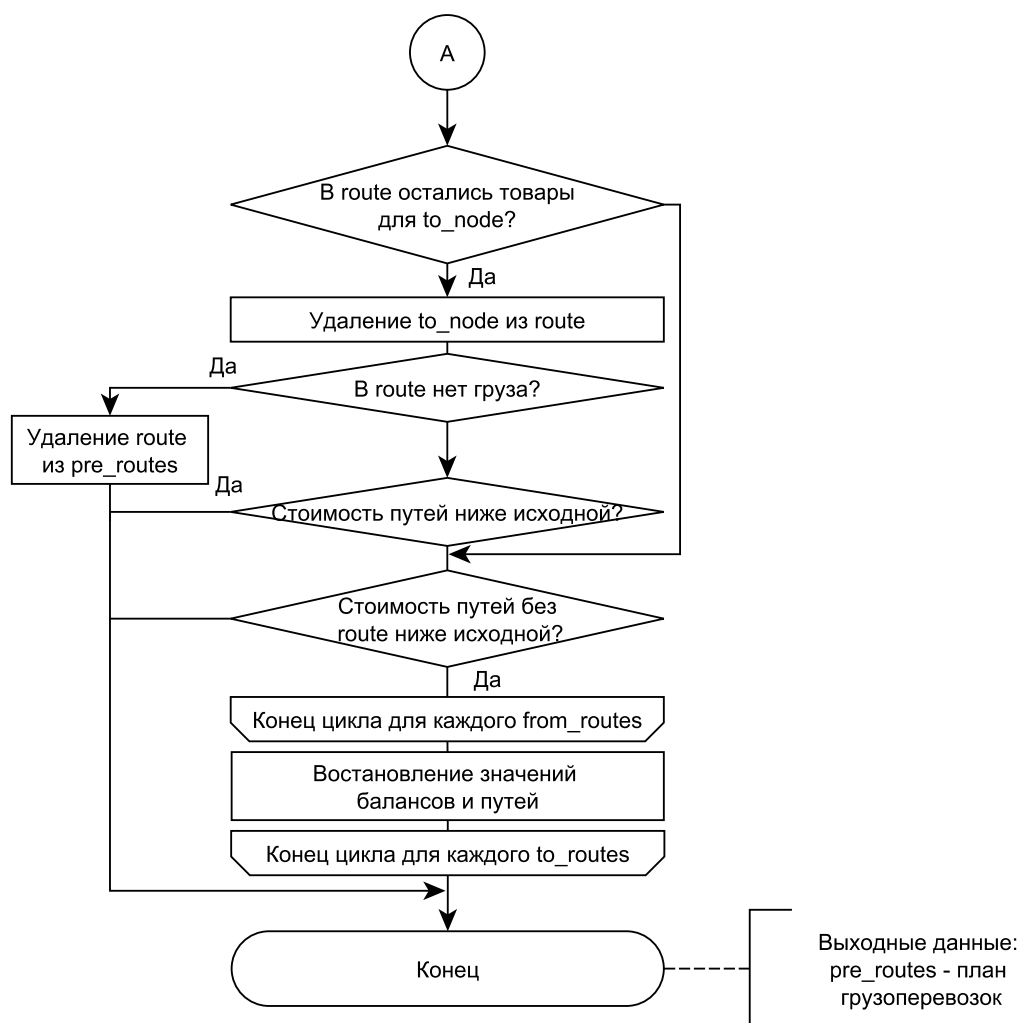


Рисунок 2.10 – Схема алгоритма оптимизации (продолжение)

### Формирование расписания

Рисунок 2.11 описывает алгоритм формирования расписания. Изначально все маршруты выставляются на начало рабочего дня, формируется время прибытия и отбытия из каждого пункта маршрута.

Далее осуществляется поочерёдное рассмотрение расписаний маршрутов, если оно не пересекается с уже принятыми, то маршрут добавляется в общее расписание с закреплением транспорта. Пересечением называется остановка на одном пункте в одинаковый промежуток времени. Величиной пересечения является общее время нахождения на пункте.

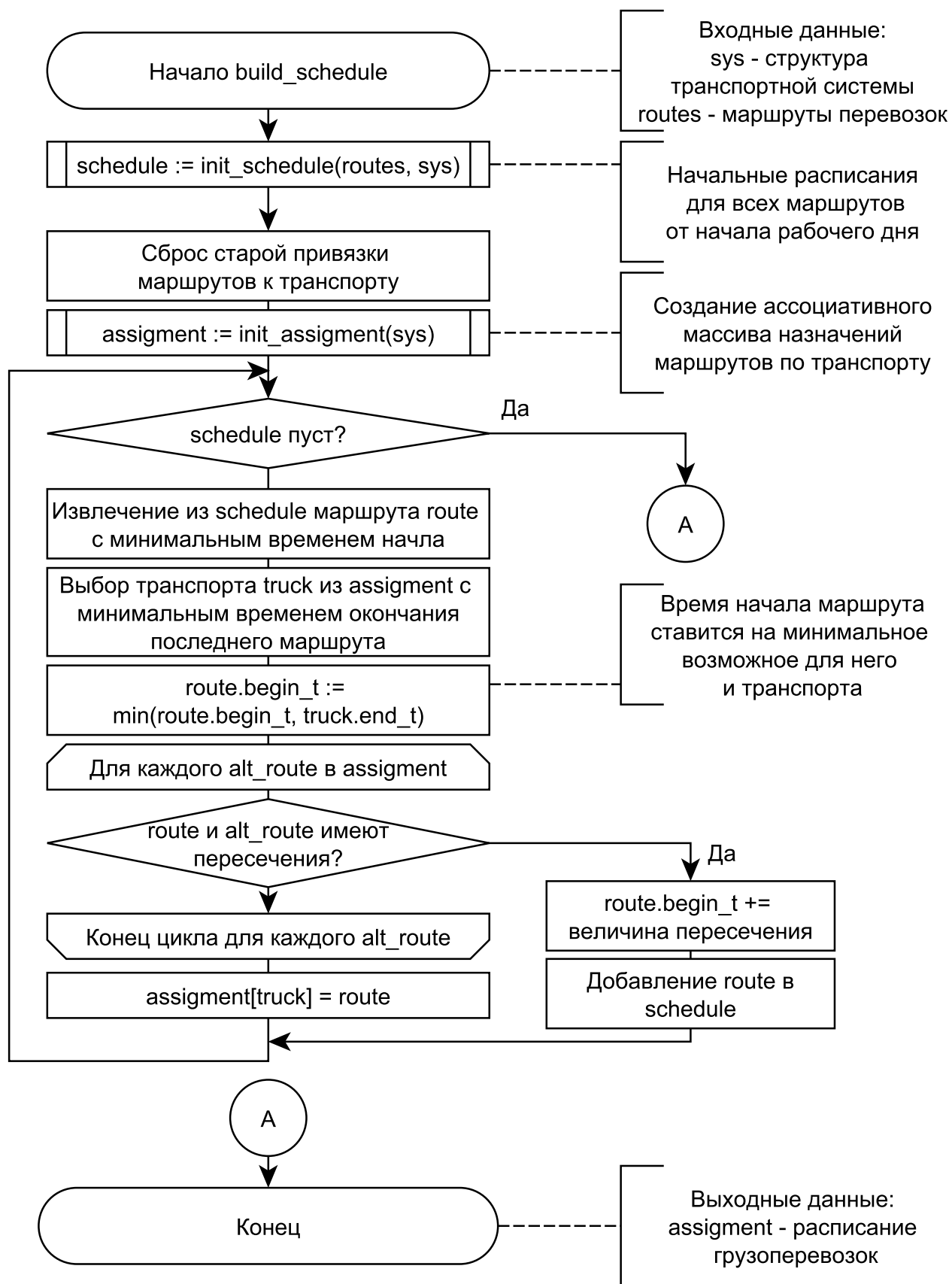


Рисунок 2.11 – Схема алгоритма составления расписания

## 2.3 Схема сущностей транспортной системы

В соответствии с ранее описанной математической моделью, в системе должны быть представлены сущности, изображённые на рисунке 2.12 с использованием ER-диаграммы.

Ключевым элементом является структура транспортной системы, содержащей в себе все пункты маршрутов. Рёбра транспортного графа описываются с помощью сущности дороги, связывающей два пункта маршрута.



Рисунок 2.12 – ER-диаграмма сущностей транспортной системы

## 2.4 Формат входных данных

В качестве входных данных выступает описание транспортной системы. Оно должно содержать в себе следующую информацию:

- Список всех пунктов маршрута.
- Вместительность (в  $m^3$ ) и количество транспорта.
- Список запасов складов. Каждый склад описывается списком продуктов (название и количество тар).

- Список заказов потребителей – аналогично запасам складов.
- Список дорог: два связанных пункта, расстояние (в км.), время проезда (в мин.).
- Объем одной тары в (в м<sup>3</sup>).
- Время начала и завершения рабочего дня.

## **2.5 Формат выходных данных**

В качестве выходных данных выступает описание плана грузоперевозок. Оно состоит из списка маршрутов, каждый из которых должен содержать в себе следующую информацию:

- Последовательность посещения пунктов.
- Номер привязанного транспортного средства.
- Список товаров, загружаемых или выгружаемых на каждом пункте.
- Список времени прибытия и отбытия в каждый пункт маршрута.

## **Вывод**

В данном разделе были представлены IDEF0 и ER диаграммы, схемы алгоритмов. Описан формат входных и выходных данных программы.

### **3 Технологическая часть**

#### **3.1 Выбор средств программной реализации**

В качестве языка программирования был выбран Python 3, ввиду следующих факторов.

- За время обучения был накоплен существенный опыт в использовании данного средства, что позволит сократить время разработки программы.
- Язык поддерживает объектно-ориентированный подход, что полезно при структурировании большого количества схожих объектов, которые были выделены ранее.
- Наличие библиотек для создания графического интерфейса, визуализации графов и временных диаграмм, которые необходимы для более наглядной демонстрации работы программы.

В качестве среды разработки был выбран PyCharm по следующим причинам.

- Данная IDE предоставляется бесплатно для пользования в учебном заведении[20].
- Имеется значительный опыт в использовании данной среды разработки.
- Представлен удобный набор инструментов для написания, тестирования и отладки кода.

#### **3.2 Используемые библиотеки**

На выбранном языке Python написаны библиотеки, позволяющие упростить визуализацию данных. Перечислим те, которые были использованы при разработке программы.

При разработке графического интерфейса пользователя использовался PyQt5. Qt является популярным графическим фреймворком[21]. Наличие среды для разработки интерфейсов Qt Designer значительно упрощает работу с данной библиотекой при создании GUI.

При создании графов применялась библиотека networkx. Она позволяет

генерировать различные типы случайных графов[22], что может быть использовано при тестировании и исследовании реализованной программы для создания случайных транспортных систем. Также имеется возможность привязки необходимой информации непосредственно к узлам и рёбрам графов.

Для визуализации временной диаграммы маршрутов и графа транспортной системы использовалась библиотека plotly[23].

### 3.3 Интерфейс программы

Для удобства задания и изменения параметров системы был разработан графический интерфейс, представленный на рисунках 3.1 – 3.3.

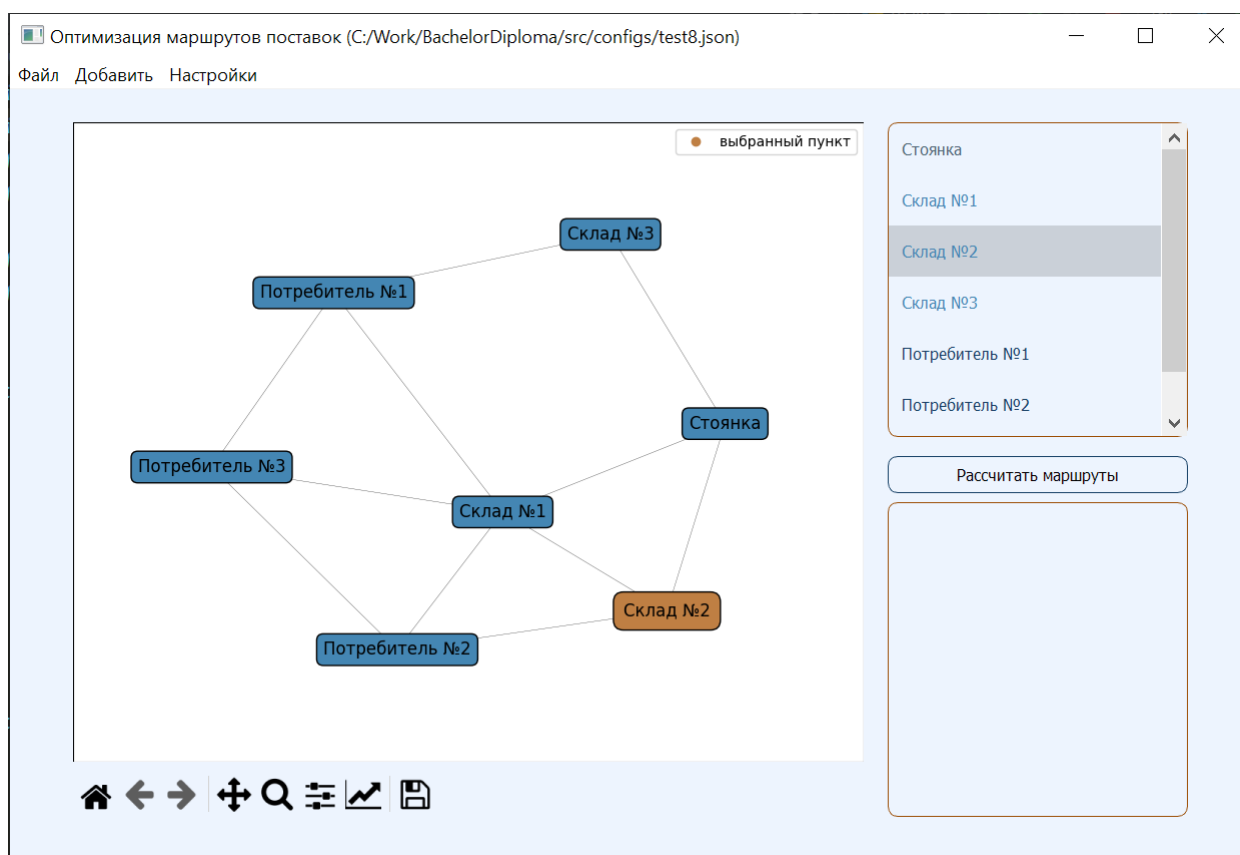


Рисунок 3.1 – Интерфейс главного окна программы

В главном окне программы происходит отображение имеющихся пунктов транспортной системы, а также её схематичной визуализации в виде графа. В данном окне пользователь может совершить следующие действия.

- Перейти к окну редактирования параметров пункта.

- Добавить новый пункт в систему.
- Импортировать транспортную систему из указанного файла.
- Экспортировать текущее состояние системы в файл.
- Настроить прочие параметры системы.
- Вызвать построение плана маршрутов.
- Посмотреть график маршрутов на временной диаграмме.

На рисунке 3.2 изображено окно изменения параметров стоянки. В данном окне пользователь может совершить следующие действия.

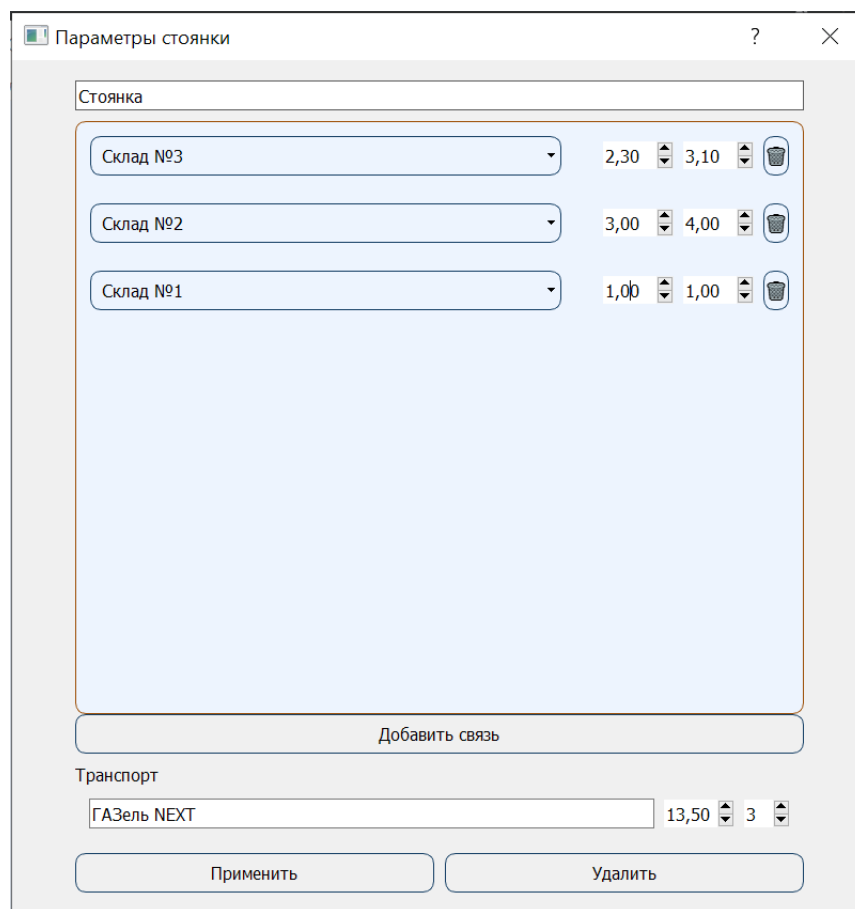


Рисунок 3.2 – Интерфейс окна параметров стоянки

- Изменить название пункта.
- Редактировать существующие дороги до других пунктов, удалять и добавлять новые.
- Изменить название, вместительность и количество машин в автопарке.
- Применить изменения.

- Удалить сущность из системы.

Схожий интерфейс имеет окно изменения параметров склада и потребителя, изображённое на рисунке 3.3. Оно позволяет дополнительно управлять набором продуктов, составляющих заказ или запас в пункте.

Параметры склада

Склад №2

Потребитель №2	1,00	1,00	
Склад №1	1,00	1,00	
Стоянка	3,00	4,00	

Добавить связь

кола	10	
кофе	20	

Добавить продукт

Применить      Удалить

Рисунок 3.3 – Интерфейс окна параметров склада

### 3.4 Результаты работы программы

Графический интерфейс также визуализирует результаты составления и оптимизации плана грузоперевозок, что отражают рисунки 3.4 – 3.9. На них изображены результаты работы метода на сети малого и большого размеров. Приведены визуализации и отчёты маршрутов, временная шкала графика передвижения транспорта по узлам сети.



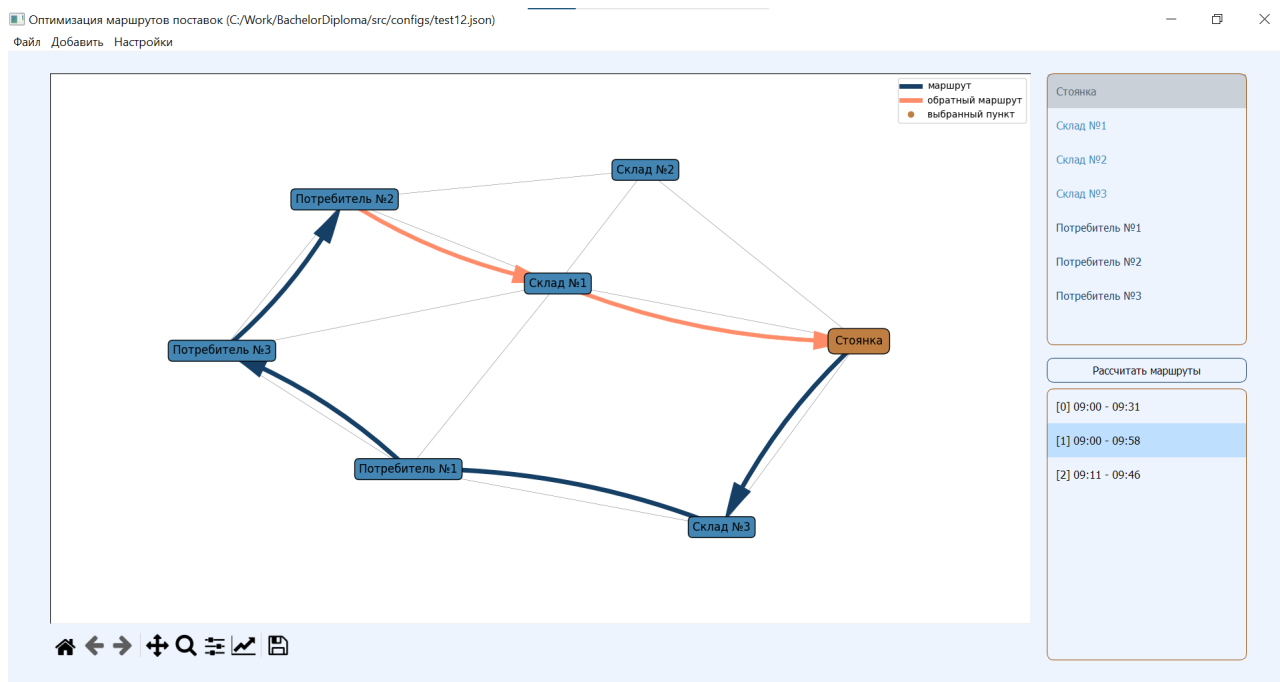


Рисунок 3.4 – Пример 1. Визуализация маршрута

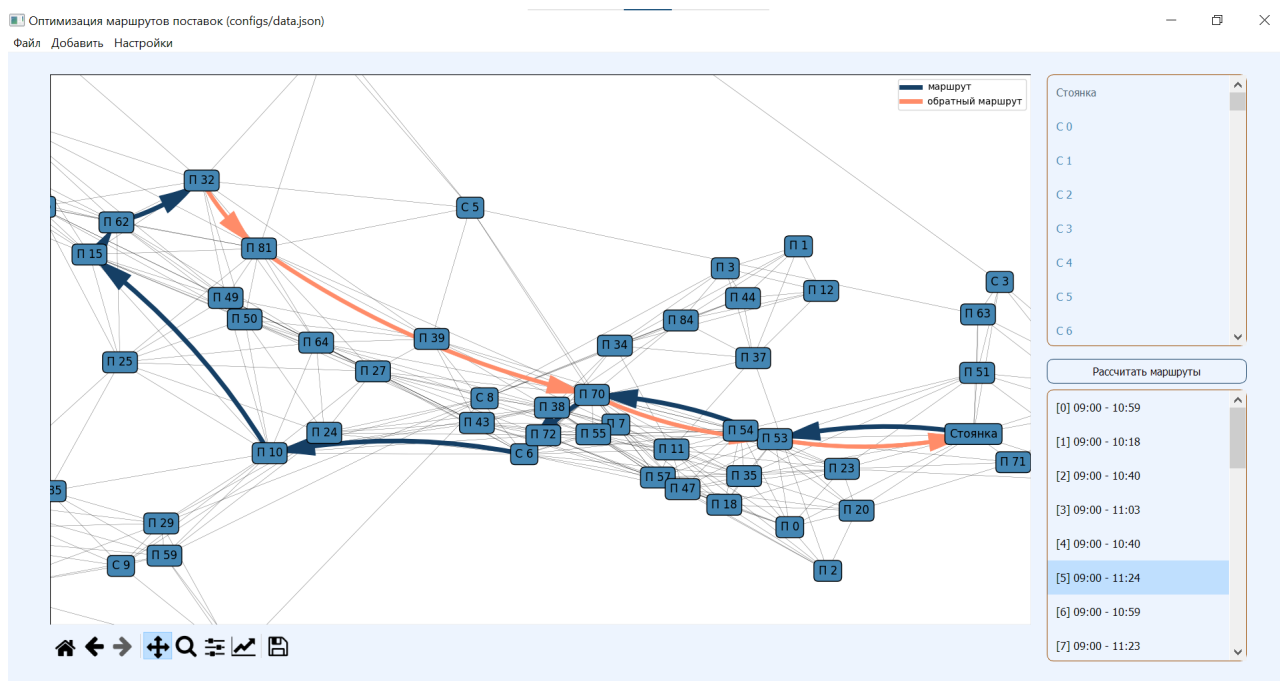


Рисунок 3.5 – Пример 2. Визуализация маршрута

Маршрут перевозки			?	×
[1] ГАЗель NEXT				
Стоянка			09:00 - 09:02	^
Склад №3			09:05 - 09:15	
<-	кола	10		
<-	шоколад	20		
Потребитель №1			09:16 - 09:28	
->	кола	10		
->	шоколад	10		
Потребитель №3			09:29 - 09:41	
->	шоколад	5		
Потребитель №2			09:42 - 09:54	
->	шоколад	5		
Склад №1			09:55	
Стоянка			09:56 - 09:58	▼

Рисунок 3.6 – Пример 1. План маршрута

Маршрут перевозки			?	×
[5] Нива				
П 68			09:27	^
С 7			09:27 - 09:37	
<-	пряники	43		
П 22			09:40 - 09:52	
->	пряники	8		
П 9			09:58 - 10:10	
->	пряники	8		
П 74			10:10 - 10:22	
->	пряники	9		
П 80			10:25 - 10:37	
->	пряники	10		
П 68			10:45 - 10:57	
->	пряники	8		
П 14			11:02	
П 46			11:03	▼

Рисунок 3.7 – Пример 2. План маршрута

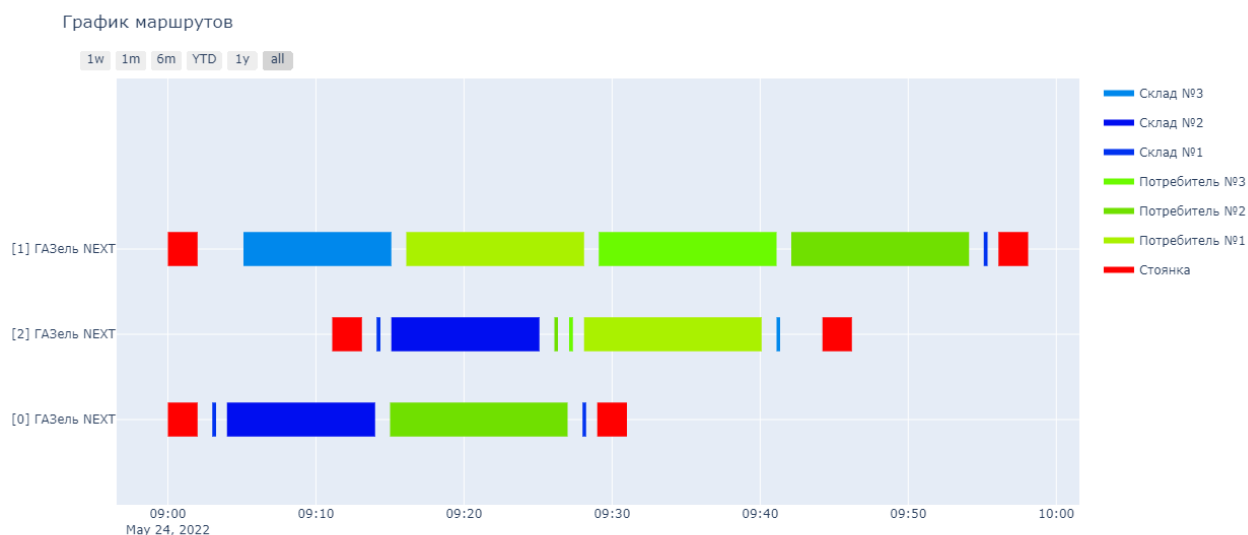


Рисунок 3.8 – Пример 1. Временной график грузоперевозок

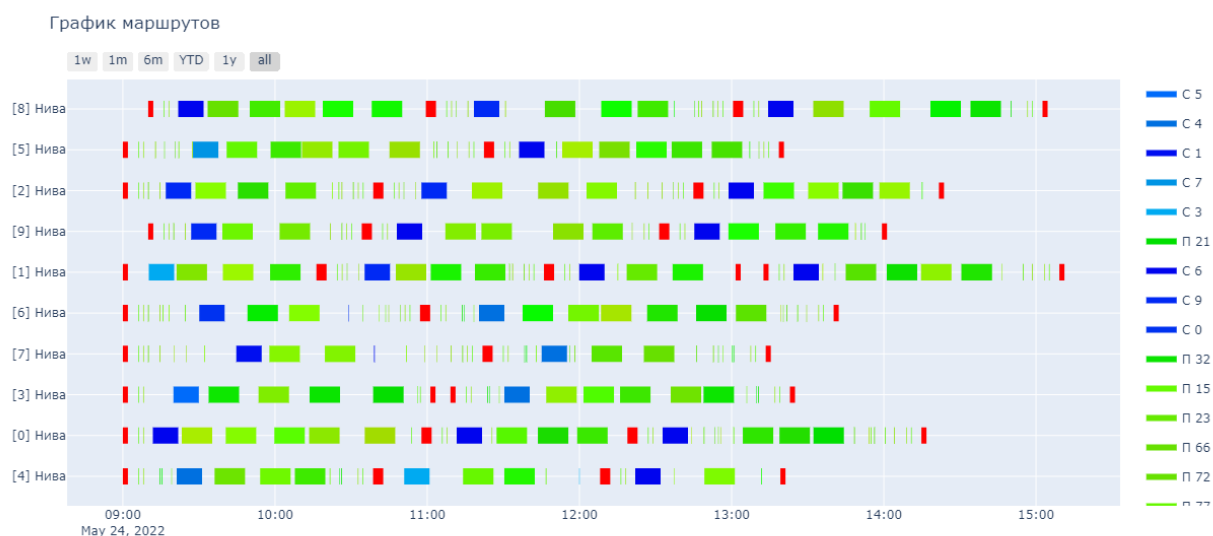


Рисунок 3.9 – Пример 2. Временной график грузоперевозок

### 3.5 Тестирование программы

Для поддержания работоспособности программы в процессе её разработки было использовано автоматическое тестирование кода. Для этого была использован встроенный модуль unittest[24].

Тестирование осуществлялось по методу чёрного ящика. В качестве вход-

ных данных выступали файлы с транспортными системами, подразумевающие различные сценарии оптимизации. В ходе одного теста проверялась корректность завершения работы методы, а также следующие выходные данные:

- количество и стоимость маршрутов в плана (сравнивается с вручную вычисленным значением для данного теста);
- удовлетворение спроса потребителей;
- соблюдение ограничений запасов продукции и вместительности транспорта;
- целостность и замкнутость маршрутов.

В качестве негативных тестов на вход программы подавались примеры систем, в которых присутствуют следующие нарушения:

- суммарный объём заказываемого товара больше имеющихся запасов;
- отдельный пункт не имеет дорог;
- граф пунктов содержит более одной компоненты связности;
- стоянка не имеет транспорта;

Ожидаемое поведение в данном случае – сообщение о неверных входных данных.

В окончательной версии программы все тесты завершаются корректно.

## **Вывод**

Результатом технологической части стал выбор средств реализации программы, а также набора необходимых библиотек. В рамках созданного приложения был реализован ранее описанный метод оптимизации. Продемонстрирован и описан интерфейс, а также примеры работы программы. Разработанное программное обеспечение покрыто тестами.

## **4 Исследовательская часть**

### **4.1 Постановка задачи**

С целью проверки работоспособности разработанного метода требуется сравнить протяжённости начального и оптимизированного плана при различных размерностях транспортной системы.

Также необходимо произвести замеры среднего времени работы программы при разном количестве пунктов маршрутов для определения ограничений его применимости.

С целью определения закономерностей работы метода будут проведены исследования зависимости общей протяжённости маршрутов от следующих параметров:

- 1) вместительность грузовика;
- 2) средняя удалённость пунктов маршрута от стоянки;

### **4.2 Генерация транспортной системы**

Для проведения экспериментов необходимо иметь описания большого количества (не менее ста) транспортных систем. Собрать большое количество реальных данных крайне затруднительно. Поэтому более предпочтительной является генерация случайной транспортной системы.

При генерации сети в первую очередь с помощью библиотеки `networkx` создаётся случайный граф. Полученные позиции вершин и их наличие рёбер между ними используется для создания дорог в транспортной системе. После этого узлам графа случайным образом сопоставляется роль пункта, набор продуктов в заказе или запасах. Пример использования сгенерированной системы приведён на рисунке 3.5.

### **4.3 Проведение экспериментов**

#### **4.3.1 Исследование работы алгоритма**

Эксперименты проводились на персональном компьютере со следующими характеристиками.

- Операционная система — Windows 10, 64-разрядная.
- Процессор — AMD Ryzen 5 5500U with Radeon Graphics 2.10 GHz.
- Оперативная память — 8,00 ГБ.

Метод потенциалов является многоитерационным, поэтому имеется возможность пронаблюдать изменение системы на каждом шаге и проанализировать за счёт чего достигается более оптимальный план.

В данном эксперименте будет исследована зависимость протяжённости маршрутов, их количества, средней длине и средней загруженности от текущей итерации оптимизации. Результат проведённого эксперимента изображён в виде графиков на рисунке 4.1. В исследовании использовались случайные транспортные системы с размерностями в 100 и 200 пунктов маршрута.

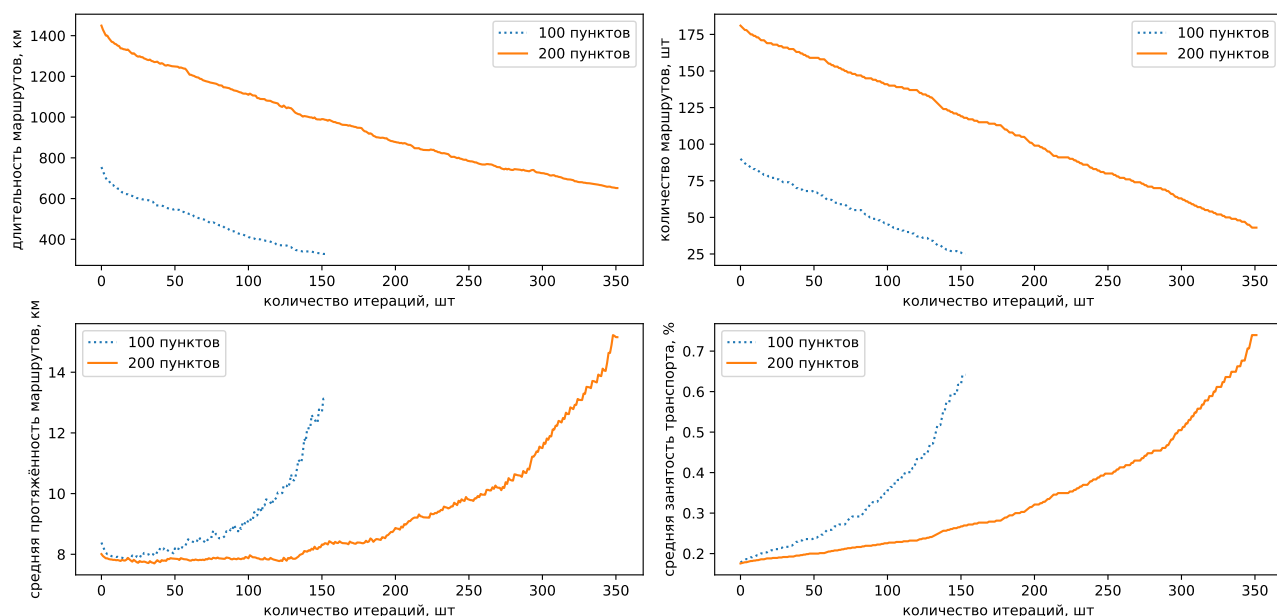


Рисунок 4.1 – Исследование работы алгоритма

Из данного графика можно сделать вывод о том, что главным образом снижение протяжённости достигается за счёт снижения общего числа маршрутов посредством продления и распределения груза на другие маршруты. Также можно отметить, что данные закономерности не зависят от размера транспортной сети.

### 4.3.2 Сравнение плана до и после оптимизации

Главным показателем корректности реализованного метода является наличие оптимизации. Оно выражается в том, что конечный план должен обладать меньшей суммарной протяжённостью для всех маршрутов по сравнению с начальным, опорным планом.

Чтобы установить выполнение данного условия в общем случае, в данном эксперименте были использованы случайно созданные транспортные сети размером от 20 до 180 пунктов. Измерения для каждой размерности проводятся многократно для усреднения полученных значений. Результат проведённого эксперимента изображён на графике, на рисунках 4.2 – 4.3.

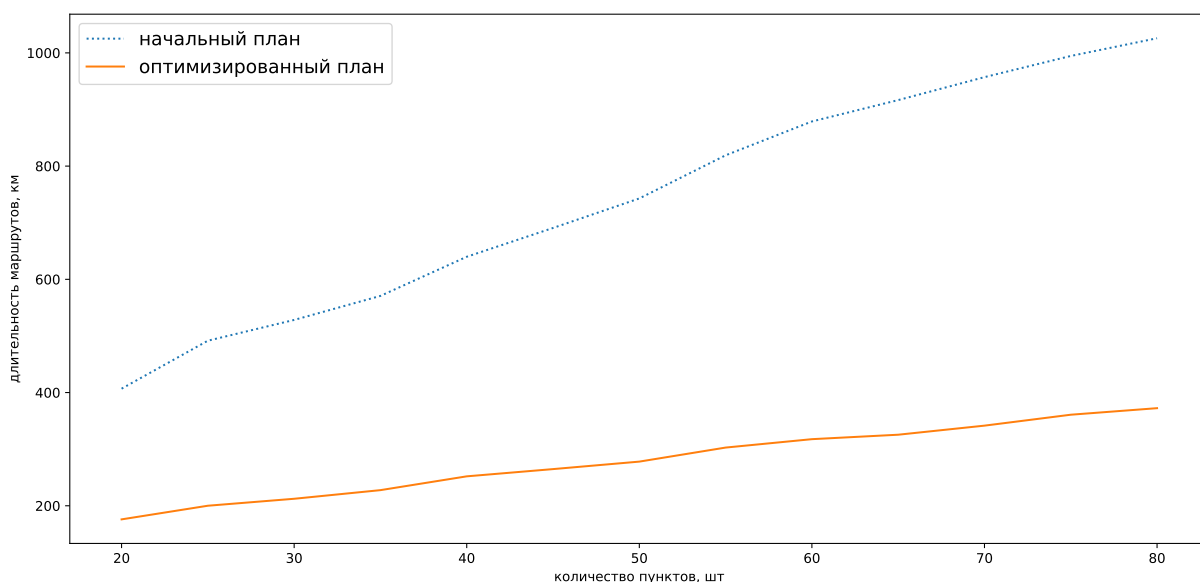


Рисунок 4.2 – Сравнение протяжённостей маршрутов до и после оптимизации

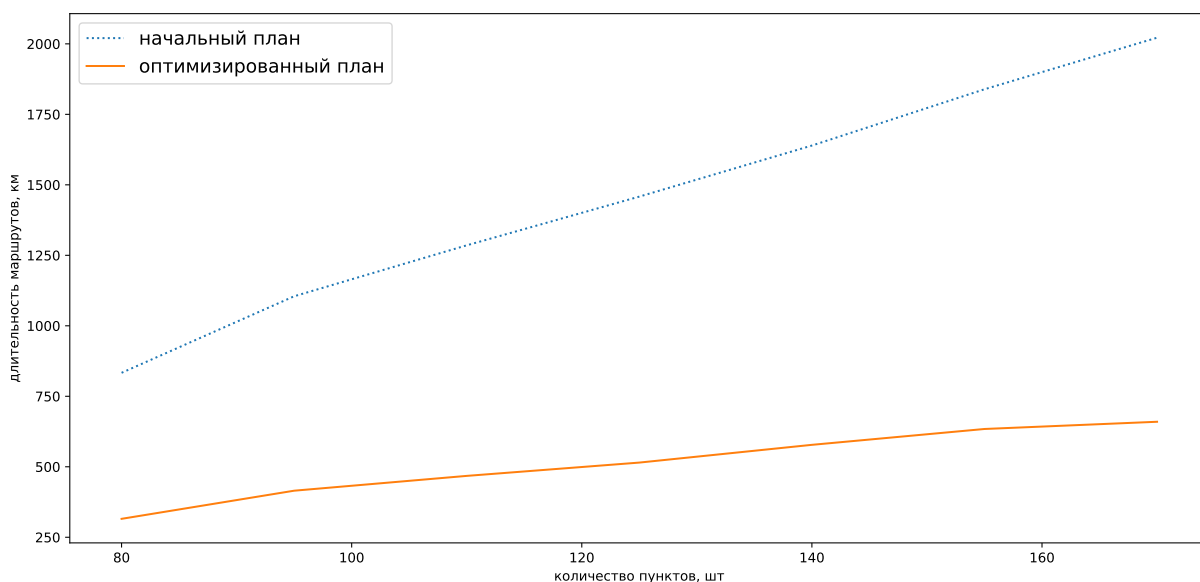


Рисунок 4.3 – Сравнение протяжённостей маршрутов до и после оптимизации (продолжение)

Результаты эксперимента показывают, что при любом рассмотренном размере оптимизация опорного плана сокращает протяжённость грузоперевозок как минимум вдвое, из чего можно заключить, что метод работоспособен.

#### 4.3.3 Определение ограничений программы

Основным ограничением в работе программы может являться рост времени её исполнения при увеличении размерности системы. Для определения существенности данного ограничения следует провести эксперимент по установлению зависимости времени обработки входных данных от их размера.

Для этого будут использованы случайно сгенерированные транспортные системы размером от 20 до 250 узлов. Результат проведённого эксперимента сведён в график, изображённый на рисунке 4.4.

Из графика можно сделать вывод о том, что характер роста функции является нелинейным. При размере сети менее 50 пунктов время оптимизации составляет менее одной секунды. Большее количество узлов приводит к значительному росту времени обработки. Можно сделать вывод о том, что программа завершает оптимизацию за приемлемое время (не более 100 секунд) в



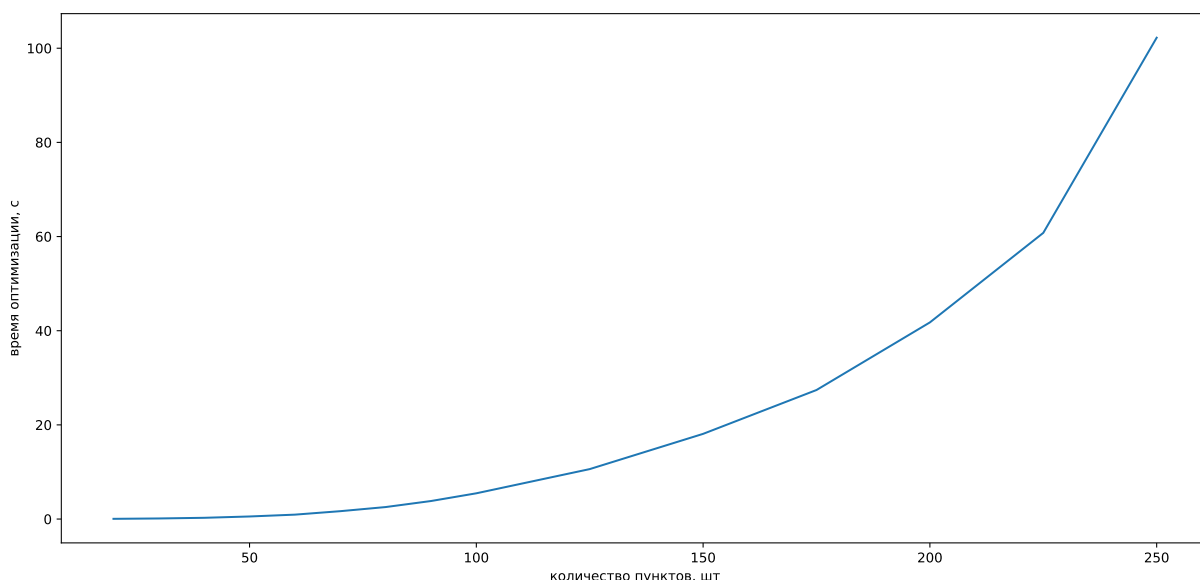


Рисунок 4.4 – Зависимость времени работы от размерности

диапазоне исследованных размерностей.

Ввиду того, что сети подобного масштаба едва ли могут встретиться на практике, а также учитывая допустимость сравнительно длительного времени работы программы, полученные характеристики можно считать приемлемыми для выполнения поставленной задачи.

#### 4.3.4 Выявление закономерностей работы системы

Разработанная программа позволяет моделировать поведение транспортной системы при изменении некоторых параметров. Рассмотрим некоторые из них.

В данном эксперименте изучается влияние вместительности грузовика на протяжённость грузоперевозок. Размер системы принят равным 50 пунктам. Средний заказ имеет объём в  $1\text{ м}^3$ . Результат эксперимента приведён на рисунке 4.5.

Из данного графика видно, что использование грузовиков меньше объёма одного заказа невыгодно.

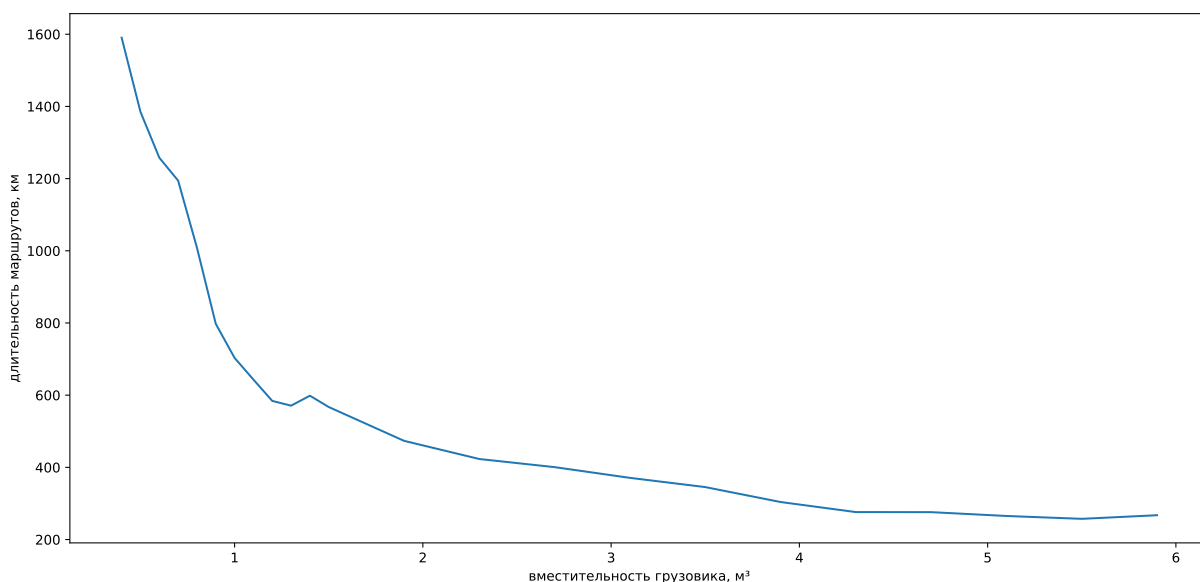


Рисунок 4.5 – Зависимость протяжённости маршрутов от вместительности грузовиков

Так как все маршруты начинаются и завершаются на стоянке, её положение относительно других пунктов может существенно влиять на маршруты. На рисунке 4.6 изображен эксперимент по выявлению зависимости суммарной протяжённости маршрутов от среднего расстояния до стоянки.

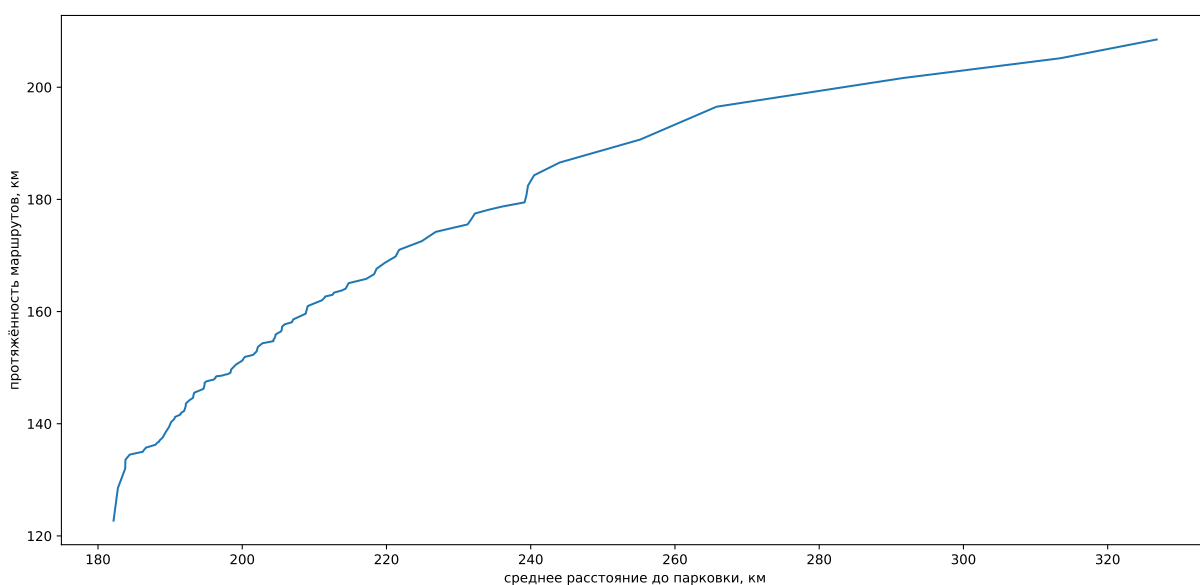


Рисунок 4.6 – Зависимость протяжённости маршрутов от удалённости стоянки

Получившийся график не является монотонным, так как средняя удалённость считается по случайно сгенерированной системе, в которой могут иметься иные параметры, влияющие на результат. Однако, с ростом среднего расстояния видна тенденция на рост общей протяжённости.

Из этих экспериментов можно сделать вывод о том, что в целях оптимизации издержек, транспортной компании следует минимизировать расстояние от стоянки до потребителей и использовать транспорт, способный вместить в себя по крайней мере несколько целых заказов.

### **Вывод**

В данном разделе были описаны цели и планы проводимых экспериментов. В их рамках были проанализированы изменения различных параметров системы при работе алгоритма оптимизации, экспериментально обоснована работоспособность метода. Были выявлены ограничения для использования разработанной программы, а также некоторые закономерности работы транспортной системы, на основе которых были предложены рекомендации по организации грузоперевозок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате написания выпускной квалификационной работы была достигнута поставленная цель: разработан собственный метод для оптимизации доставки товаров.

В ходе выполнения цели работы были выполнены следующие задачи:

- проанализированна предметная область задачи, проведён сравнительный анализ с известными решениями, выявлены основные особенности;
- установлены цели создания метода, его критерий оптимизации, допущения и ограничения;
- описана математическая модель в рамках формализации задачи;
- выделен, описан и реализован метод оптимизации грузоперевозок в транспортной системе;
- проведено исследование алгоритма, работоспособности программы и её ограничений.

Объём проделанной работы полностью удовлетворяет требования технического задания. Разработанное приложение позволяет воссоздавать в нём различные транспортные системы и производить составление оптимального плана грузоперевозок, который представляется в графическом формате.

В качестве направлений дальнейшего развития можно выделить добавления следующих возможностей.

- Расчёт транспортировки тар различного объёма в транспортных средствах различной вместительности.
- Задание приоритетов очередности доставки.
- Редактирование транспортной системы и перестройка плана в течении дня.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Милов Сергей Николаевич, Милов Алексей Сергеевич. Исследование проблем управления ассортиментом и товарными запасами в торговых сетях // Вестник РЭА им. Г. В. Плеханова. 2019. №5 (107).
2. Хашман Т.Т. Управление цепочками поставок. Гуманитарный вестник, 2013, вып. 10. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.hmbul.ru/articles/114/114.pdf> (дата обращения 24.11.2021)
3. Костышева Яна Вячеславовна Эффективность применения программных обеспечений в области транспортной логистики // Экономикс. 2013. №1.
4. Макаров М. А., Мартынюк А. В., Зарецкий А. В. Транспортная логистика // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2012. №12.
5. Логистика для малого бизнеса при небольших объёмах [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://itctraining.ru/biblioteka/logistika-ved/postroenie-logistiki-pri-nebolshikh-obemakh>, свободный (дата обращения 01.12.2021)
6. Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума НАУКА И ИННОВАЦИИ- СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ (г. Москва, 25 января 2019 г.). / отв. ред. Д.Р. Хисматуллин. – Москва: Издательство Инфинити, 2019. – 140 с.
7. Болтнев Д. Е. и др. Экспериментальные и теоретические зависимости пройденного пути и расхода топлива от скорости движения автомобиля на опытных участках, имеющих различные уклоны //Системы. Методы. Технологии. – 2021. – №. 3. – С. 105-115.
8. А. В. Кузнецов, Н. И. Холод, Л. С. Костевич. Руководство к решению задач по математическому программированию. — Минск: Высшая школа, 1978. — С. 110.

9. С. И. Носков, А. И. Рязанцев. Двухкритериальная транспортная задача // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. С. 59-63
10. И.В. Романовский. Алгоритмы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1977. 352 с.
11. Алгоритмы. Построение и анализ : пер. с англ. / Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. [и др.]. - 3-е изд. - М. : Вильямс, 2018. - 1323 с. : ил.
12. Сеславин А.И., Сеславина Е.А. Оптимизация и математические методы принятия решений. Учебное пособие. – М.: МИИТ, 2011. – 152.
13. Алгоритмы. Руководство по разработке — 2-е изд.: Пер. с англ. — СПб.: БХВ-Петербург, 2018. — 720 с.: ил.
14. Терентьев Д. А., Тимофеев А. В. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ //АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК В РОССИИ И. – 2016. – С. 166.
15. Косенко О.В. дис. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ МНОГОИНДЕКСНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ канд. техн. наук: 05.13.01. – «ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И УПРАВЛЕНИЯ (ИРТСУ), Таганрог – 2017 г. - 172 с.
16. Герасименко Е. М. Метод потенциалов для определения заданного потока минимальной стоимости в нечетком динамическом графе // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. №4 (153)
17. Кривопалов В. Ю. РЕШЕНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ПУНКТАМИ И ОГРАНИЧЕНИЕМ ПО ТРАНЗИТУ //Главный редактор СВ Симак. – С. 28.

18. Цехан О. Б. Моделирование и алгоритмизация одной задачи планирования многопродуктовых перевозок с запрещенным транзитом //Веснік ГрДУ імя Я. Купалы.–Серия. – 2011. – Т. 2. – С. 73-89.
19. Пиневич Е. В., Ганженко Д.В. МЕТОД ИНТЕРВАЛОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЯ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК // ЗАМЕТКИ УЧЕНОГО - 2021. - С. 317 - 321
20. Бесплатные лицензии для обучения программированию [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/community/education>, свободный (дата обращения 09.04.2022)
21. Сайт PyQt [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro>, свободный (дата обращения 09.05.2022)
22. Сайт документации Networkx [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://networkx.org>, свободный (дата обращения 10.05.2022)
23. Сайт графической библиотеки Plotly [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://plotly.com>, свободный (дата обращения 10.05.2022)
24. Сайт документации фреймворка для тестирования unittest [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.python.org/3/library/unittest.html>, свободный (дата обращения 20.04.2022)