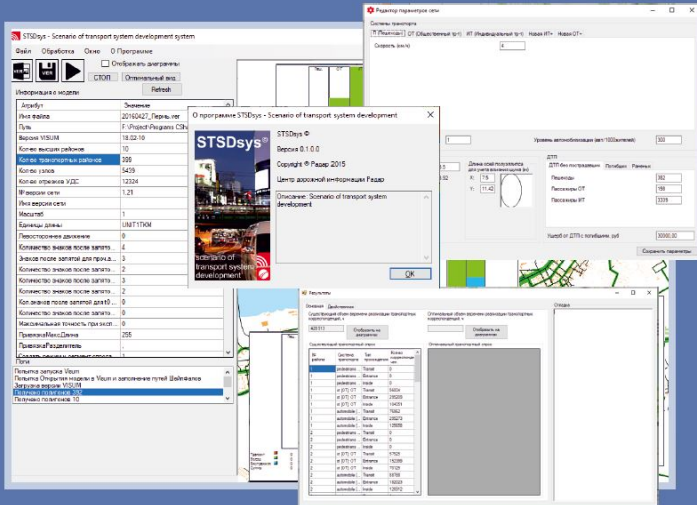


# Агентство дорожной информации РАДАР



**STSDsysR 0.1.0.0**  
(Scenario of transport system development)

**Руководство пользователя**



УДК 681.3

ББК 39.8

P85

Рецензент:

**Ю.В. Трофименко**, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета, д.т.н., профессор

P85

Руководство пользователя программного обеспечения в области транспортного планирования и моделирования STSDsysR / под ред. Якимова М.Р. - Москва: Агентство РАДАР, 2023. – 106 с. ISBN 978-5-6048401-3-9

Scenario Transport System Development (STSDsysR) – программный комплекс для построения и решения оптимизационных задач по распределению транспортного спроса и транспортных ресурсов. В первой главе руководства пользователя даются теоретические основы алгоритма работы STSDsysR, описывается постановка оптимизационной задачи, показан процесс поиска решения оптимизационной задачи. Во второй главе представлена практическая реализация алгоритма моделирования в программном комплексе STSDsysR, описан порядок ввода исходных данных, работа с интерфейсом, запуск процедуры расчета модели и поиска неизвестных, а также наглядно продемонстрировано, как реализуется вывод и отображение результатов моделирования в программном комплексе STSDsysR.

Руководство пользователя предназначено для специалистов транспортных администраций, работающих в органах исполнительной власти различных уровней, практикующих специалистов в области транспортного планирования, организации дорожного движения, транспортного моделирования, работников проектных и консалтинговых организаций, студентов, аспирантов и преподавателей транспортных вузов и транспортных специальностей.

## РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ STSDsysR

Подписано в печать 29.08.2023. Формат 60×90 1/16.

Печать цифровая. Печ. л. 6,625. Тираж 300 экз. Заказ № 2

Отпечатано в типографии ООО «Агентство дорожной информации РАДАР»

E-mail: road-auto@mail.ru

© Агентство РАДАР, 2023

© М.Р. Якимов, 2023

## Содержание

<b>Введение</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Теоретические основы алгоритма работы STSDsysR</b> .....	<b>5</b>
1.1 Математические модели в задачах оптимизации.....	5
1.1.1. Транспортные модели различного назначения.....	5
1.1.2. Объект и предмет оптимизации.....	7
1.1.3. Решаемые задачи.....	9
1.2. Постановка оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города.....	9
1.2.1. Логико-графическая модель постановки оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города.....	9
1.2.2. Возможные способы формализации задачи формирования эффективной транспортной системы.....	11
1.2.2.1. Задача распределения транспортного спроса.....	13
1.2.2.2. Задача распределения транспортного предложения.....	16
1.3. Построение математической модели оптимизационной задачи.....	19
1.3.1. Задание степеней свободы оптимальной модели. Выбор переменных.....	19
1.3.2. Формирование целевой функции оптимальной модели.....	22
1.3.3. Формирование системы ограничений математической модели оптимизационной задачи.....	23
1.3.3.1. Структурная схема ограничений оптимальной модели.....	23
1.3.3.2. Ограничение по транспортному спросу.....	27
1.3.3.3. Ограничение по протяженности существующей УДС.....	32
1.3.3.4. Ограничение по имеющемуся подвижному составу.....	39
1.3.3.5. Особенности построения энергетических ограничений.....	44
1.3.3.6. Экологическое ограничение.....	45
1.3.3.7. Постановка ограничения по уровню шума.....	50
1.3.3.8. Ограничения по рискам возникновения ДТП.....	63
1.3.4. Оптимальная модель формирования эффективной транспортной системы российского города на примере города Перми.....	76
1.4. Поиск решения оптимизационной задачи.....	81
1.5. Оптимальная модель двойственной задачи.....	83
<b>2. Практическая реализация алгоритма моделирования в программном комплексе STSDsysR</b> .....	<b>89</b>
2.1. Описание функциональных характеристик программного обеспечения STSDsysR.....	89
2.1.1. Общие сведения.....	89
2.1.2. Интерфейс, размерность транспортной сети, экспорт и импорт данных.....	90

---

2.1.3. Требования к режимам функционирования.....	92
2.1.4. Опыт внедрения.....	93
2.2. Инструкция по установке экземпляра программного обеспечения STSDsysR.....	94
2.2.1. Минимальные требования к аппаратному обеспечению для работы.....	94
2.2.2. Установка и запуск.....	94
2.3. Информация о процессах, обеспечивающих поддержание жизнен- ного цикла программного комплекса .....	94
2.3.1. Поддержание жизненного цикла программного комплекса..	94
2.3.2. Устранение неисправностей.....	95
2.3.3. Модернизация программного комплекса.....	95
2.4. Импортирование первичных исходных данных.....	95
2.5. Ввод исходных данных, работа с интерфейсом.....	95
2.6. Запуск процедуры расчета модели и поиска неизвестных.....	100
2.7. Вывод и отображение результатов моделирования.....	100
<b>Заключение.....</b>	<b>103</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>104</b>

## Введение

По своему назначению применяемые транспортные модели, как и большинство математических моделей, делятся на оптимизационные транспортные модели, прогнозные транспортные модели и имитационные транспортные модели. Последовательное применение этих моделей позволяет сформировать и выбрать управленческие решения на основе формализованных целевых индикаторов и расчетных показателей качества функционирования транспортной системы.

Оптимизационные модели используют информацию о существующей транспортной инфраструктуре, о существующем транспортном спросе, восстановленном, как правило, из модели текущего состояния транспортной инфраструктуры, и позволяют решить оптимизационную задачу поиска экстремума некоей целевой функции, выраженной в виде целевого индикатора достигаемых эффектов от развития транспортной системы при выполнении определенных ограничений. В случае постановки оптимизационной задачи развития транспортной системы такими ограничениями могут выступать территориальные ограничения, ограничения на загрязнение окружающей среды выбросами и параметрическими загрязнениями, а также ограничения на уровень рисков дорожно-транспортных происшествий.

Оптимизационная модель позволяет найти распределение существующего транспортного спроса по территории городской агломерации всеми способами и всеми видами транспорта оптимальным образом с учетом введенных ограничений. Кроме того, оптимизационная модель при решении двойственной задачи позволяет сформировать примерные сценарии развития транспортной системы, а именно необходимые объемы развития транспортной инфраструктуры в тех или иных транспортных зонах.

Для построения, решения и анализа результатов решения оптимизационных транспортных моделей используется программное обеспечение STSDsysR.

# 1. Теоретические основы алгоритма работы STSDsysR

## 1.1 Математические модели в задачах оптимизации

### 1.1.1. Транспортные модели различного назначения

Решение задач в области формирования и развития инфраструктуры крупного города может быть получено на основе построения математических моделей транспортных систем городов. Среди всего разнообразия математических моделей, применяемых для анализа транспортных сетей, можно выделить три основные группы моделей:

1. прогнозные модели;
2. имитационные модели;
3. оптимизационные (оптимальные) модели.

Прогнозные модели предназначены для моделирования транспортных потоков в сетях с известной геометрией и характеристиками и при известном транспортном спросе. При помощи этих моделей можно прогнозировать последствия изменений как в транспортном спросе, так и в транспортном предложении. Модели этого типа применяются для поддержки решений в области планирования развития города, для анализа последствий тех или иных мер по организации движения, выборе альтернативных проектов развития транспортной сети и др.

Задача прогноза загрузки транспортной сети обычно состоит в расчете усредненных характеристик движения, таких как: объемы межрайонных передвижений, интенсивности потока, распределение автомобилей и пассажиров по путям движения и др. В отличие от этого имитационное моделирование ставит своей целью воспроизведение всех деталей движения, включая развитие процесса во времени. Объектом исследования при этом является одиночное транспортное средство, а не транспортный поток. При этом усредненные значения потоков и распределение по путям считаются известными и служат исходными данными для этих моделей. Таким образом, прогноз потоков и имитационное моделирование являются дополняющими друг друга направлениями. Имитационные модели позволяют оценить скорости движения, задержки на перекрестках, длины и динамику образования «очереди» или «заторов» и другие характеристики движения. Основная область применения таких моделей – совершенствование организации дорожного движения.

Разумеется, области применения прогнозных и имитационных моделей не строго разделены. Рассмотрим, например, задачу согласования светового регулирования вдоль крупной улицы. Для решения такой задачи может быть использована имитационная модель. С другой стороны, улучшение условий проезда по данной улице может привести к тому, что боль-

шее количество водителей будет выбирать маршруты проезда с использованием этой улицы. Это, в свою очередь, приведет к ослаблению нагрузки на другие улицы и к дальнейшему перераспределению потоков. Таким образом, возникает задача о прогнозе нового распределения потоков по городу, которое установится после проведения данного мероприятия.

Модели прогноза потоков и имитационные модели ставят своей целью адекватное воспроизведение транспортных потоков. Существует, однако, большое количество задач оптимизации функционирования транспортных сетей. В этом классе решаются задачи оптимизации маршрутов пассажирских и грузовых перевозок, выбор оптимального пути и др.

На основе взаимосвязей моделей друг с другом все три класса математических моделей, использующиеся при изучении функционирования транспортных систем, можно разделить также по объектам исследований, целям моделирования, входным и выходным данным (табл. 1.1).

*Таблица 1.1*

### **Классификация математических транспортных моделей по различным признакам**

<b>Вид моделей</b>	<b>Объект исследования (моделирования)</b>	<b>Цель моделирования</b>	<b>Вход (исходные данные)</b>	<b>Выход (результат моделирования)</b>
Имитационные модели	Транспортное средство	Оценка проектов	Транспортный поток	Управленческое решение
Прогнозные модели	Транспортный поток	Оценка сценариев	Сценарии	Транспортный поток
Оптимизационные модели	Транспортная система	Оценка системы	Цель, ограничения	Сценарий

Решение проблемы анализа и развития транспортной системы на основе спроса на передвижение предлагается осуществить с помощью методов математического программирования, в частности инструментов линейного программирования. Методы математического программирования применяются к оптимизационным задачам. Они возникают там, где есть свобода выбора. В планировании транспортных потоков присутствует свобода выбора; есть система показателей, характеризующих функционирование транспортной системы; есть критерии оценки УДС; определены условия (ограничения) в виде спроса на передвижения и физических ограничений улично-дорожной сети; экологических, экономических ограничений.

Особое внимание в исследовании транспортной системы города отводится пространственному анализу распределения транспортного спроса по городской территории без учета конкретного транспортного предложения. Такой подход не укладывается в привычное понятие транспортного

моделирования, так как объектом исследования служат не транспортные средства и даже не транспортные потоки, а отдельные участки городской территории. Результатом моделирования будут являться определенные параметры, накладываемые на территорию, такие, например, как предельные объемы транспортных корреспонденций, реализуемые тем или иным видом транспорта на исследуемой территории.

Результаты, полученные при расчете моделей, можно будет использовать для принятия управленческих решений по развитию улично-дорожной сети. Использование такого инструмента исследования как оптимальные модели предполагает разработку и построение нескольких моделей с различными критериями и ограничениями, чтобы рассматривать задачу формирования эффективной транспортной системы города с разных позиций.

### **1.1.2. Объект и предмет оптимизации**

Объектом оптимизации является территория крупного города, а предметом оптимизации являются процессы функционирования на этой территории транспортной системы. Выделяя в качестве предмета исследования только одну составляющую тех многочисленных процессов, которые происходят в жизни современного города, можно сказать, что в данной работе объектом исследования является крупный город, а предметом исследования является его транспортная система. Детализируя предмет исследований на составляющие: дорожно-транспортный комплекс, участники дорожного движения, окружающая среда, можно сказать, что в такой трактовке объектом и предметом исследований является транспортная система. Именно окружающая среда (территория города), являясь составляющей частью транспортной системы, определяет, как объект исследования, так и способы взаимодействия оставшихся двух составляющих транспортной системы.

Основным допущением в постановке оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города будет неизменность транспортного спроса. Неизменность транспортного спроса предполагает неизменность баланса использования территории под объектами различного назначения, которые и формируют этот транспортный спрос. Иными словами – задача будет поставлена и решена при помощи математической модели при неизменном (устоявшемся) на исследуемой территории транспортном спросе. При необходимости исследования поведения транспортной системы города при изменении транспортного спроса возникнет необходимость в постановке, формализации и решении уже иной задачи.

Объектом воздействия при исследовании транспортной системы является улично-дорожная сеть крупного города как самая основная, главная часть всей инфраструктуры. Улично-дорожная сеть представляет собой



систему улиц и дорог в единой транспортной системе города. Основная задача улично-дорожной сети состоит в эффективном и безопасном удовлетворении спроса ее пользователей, т.е. в перемещении заданного объема пассажиро- и грузопотоков, а также в обеспечении комфортного движения пешеходов.

Транспортное планирование и организация дорожного движения базируются на теории транспортных потоков, на использовании разнообразного математического инструментария моделирования УДС. Одним из важнейших видов исходных данных для принятия решений в этой сфере является матрица корреспонденций, значения ее элементов (корреспонденций) представляют количество транспортных средств, направляющихся из одного пункта в другой. В качестве пунктов следования можно взять центры транспортных районов. Практически формирование матрицы корреспонденций крупного города – это самостоятельная серьезная задача. Будем считать матрицу корреспонденций заданной. Методика ее формирования описана в [1].

При анализе функционирования транспортных систем городов первоочередной интерес представляют технологии и алгоритмы оценки территории городов с точки зрения их возможности удовлетворять имеющийся транспортный спрос. Именно территориальные (в широком понимании этого термина) ограничения определяют и возможности развития территории, виды её использования и в конечном итоге – качество жизни на этой территории. Транспортное движение на городской территории как ничто другое иллюстрирует тот факт, что потребности в моторизованном движении никогда не могут быть удовлетворены полностью. С одной стороны, увеличивающийся транспортный спрос требует увеличения транспортного предложения. С другой стороны, увеличение транспортного предложения приводит к отрицательным эффектам – увеличиваются затраты на реализацию транспортного спроса, увеличивается негативное воздействие на окружающую среду.

Формализация (моделирование) процесса движения транспортных средств осложняется, прежде всего, следующими факторами:

- Объем генерации транспортного потока зависит от множества факторов, сбор информации о которых представляет собой отдельную научную задачу;
- Критерии оценки качества организации дорожного движения неоднозначно определены различными субъектами транспортной системы: участниками дорожного движения, представителями органов власти, надзорными органами (ГИБДД) и т.д. Кроме того, необходимо учитывать и сложившиеся закономерности развития транспортной системы города. Незнание действительного состояния транспортного движения по всей транспортной сети города приводит к принятию ошибочных управленческих

решений, как следствие к перегрузке (недогрузке) отдельных перегонов и узлов, образованию транспортных заторов, повышению уровня аварийности, ухудшению экологии города. Управление транспортными потоками, проектирование улично-дорожной сети и организация дорожного движения – глобальные насущные проблемы любого современного мегаполиса. Для решения этих проблем необходимы: измерение (сбор данных), наблюдение, моделирование, управление.

### **1.1.3. Решаемые задачи**

Задача построения модели формирования эффективной транспортной системы крупного города предусматривает последовательное решение ряда подзадач:

- формализация объекта исследования (области исследования). Десять транспортных зон;
- определение степеней свободы решаемой задачи. Три способа передвижений – пешком, на общественном транспорте, на индивидуальном транспорте;
- выбор критерия оптимальности (значение и единицы измерения целевой функции). Целевая функция будет представлять собой время и измеряться в минутах;
- выбор и формализацию «верхних» ограничений, накладываемых на целевую функцию: 1) по спросу на перемещение в исследуемых областях; 2) по выбросам загрязняющих веществ; 3) по протяженности существующей улично-дорожной сети; 4) по рискам возникновения ДТП;
- выбор и формализацию «нижних» ограничений. Объемы перемещений по территории, связанные с существующим транспортным спросом;
- детализация «нижних» ограничений по различным типам передвижения в исследуемых областях для каждого типа прохождения маршрута.

## **1.2. Постановка оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города**

### **1.2.1. Логико-графическая модель постановки оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города**

Одним из показателей успешного развития города является наличие в нем эффективной транспортной системы. Цель функционирования транспортной системы города, как любой природно-технической системы, заключается в повышении качества жизни на той территории, где она функ-

ционирует.

На рисунке 1.1 представлена логико-графическая модель постановки оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города. Модель представляет собой графическую интерпретацию логических построений при переходе от рассмотрения задачи повышения качества жизни на территории города к составляющим математической модели оптимальной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города. Из модели хорошо видно, что при постановке задачи эффективность есть результат сопоставления целей – времени реализации транспортных корреспонденций и ресурсов, затрачиваемых на достижение этих целей. В свою очередь, все ресурсы поделены на территориальные и энергетические.

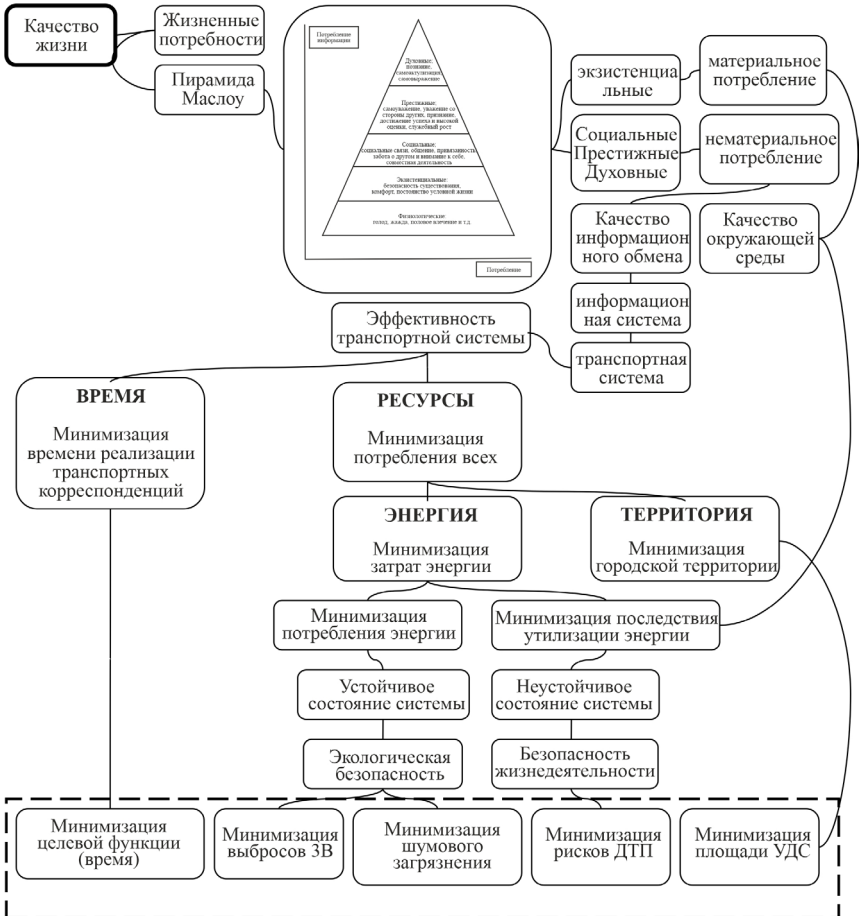


Рис. 1.1. Логико-графическая модель постановки оптимизационной задачи

Подробнее рассмотрено движение энергии в системе. Очевидно, что введение в транспортную систему города каждой дополнительной единицы транспорта вносит в систему дополнительную энергию, при этом забирая часть городской территории, необходимой, в том числе, и для устойчивой утилизации этой энергии. В нижней части рисунка выделены итоговые составляющие, необходимость включения которых в математическую модель следует из логики постановки задачи повышения качества жизни в городе.

### **1.2.2. Возможные способы формализации задачи формирования эффективной транспортной системы**

Формирование и управление транспортной системой включают в себя совокупность мероприятий, направленных на регулирование транспортно-го спроса, оптимальное распределение его по территории, снижение энергоёмкости городских перевозок, обеспечение безопасности функционирования, минимизацию временных затрат использования всех видов ресурсов (территория, энергия).

Целевой показатель функционирования транспортной системы – минимум средневзвешенного времени реализации транспортных корреспонденций всеми участниками движения с учетом средней скорости движения и дальности корреспонденций, совершаемых участниками посредством всех видов транспорта при выполнении ограничений по потребляемым ресурсам и транспортному предложению (верхние ограничения) и ограничений транспортного спроса (нижние ограничения).

Целевая функция учитывает потребности на передвижения для всего населения города. Следовательно, и ограничения должны учитывать потребности всех жителей города. Таким образом, если целевая функция будет доставлять минимум времени реализации транспортной корреспонденции на одного человека, то и ограничения при этом будут представлять собой предельный вред от функционирования транспортной системы того или иного рода, приходящийся на одного жителя города.

При рассмотрении различных сторон формирования эффективной транспортной системы города возможны самые различные подходы, определяющие предмет исследований – транспортную систему города.

Возможные критерии оптимальности функционирования транспортной системы города:

- минимум затрат времени на перемещения всех участников движения;
- максимум средней скорости передвижения всех участников движения;
- минимум затрат денежных средств на перемещение всех пассажиров любым способом;

- минимум затрат на содержание транспортной инфраструктуры.

Возможные переменные и степени свободы задачи построения эффективной транспортной системы:

- переменные модели могут обозначать количество пассажиров, которым необходимо переместиться из одного района в другой тем или иным способом (пешком, ОТ, ИТ);
- переменные модели могут обозначать необходимый объем транспортной инфраструктуры того или иного вида;
- Также возможны и различные варианты задания и последующего учета ограничений на функционирование системы;
- Ограничения по спросу. Для каждого вида и целей перемещения строятся отдельные матрицы корреспонденций, которые содержат объем спроса на передвижения пассажиров, грузов между транспортными районами города. Спрос должен быть удовлетворен полностью;
- Ограничения по имеющимся возможностям УДС. Объем этого ресурса ограничен, он может быть выражен площадью всего дорожного полотна или длиной всех полос проезжих частей;
- Ресурсные ограничения. Необходимая информация о предельно допустимом воздействии транспортной системы на отдельную городскую территорию.

Объектом управления в системе является транспортный поток, состоящий из различных видов транспортных средств. Транспортный поток описывается теми же характеристиками, что и поток жидкости или газа: скоростью, плотностью, интенсивностью и составом потока. В то же время водители автомобилей обладают свободной волей и реализуют свои частные цели. Поэтому управлять транспортным потоком, учитывая только технические аспекты, невозможно. Ситуация осложняется отсутствием надежных технических средств (датчиков), предназначенных для получения данных о транспортных потоках. Проведение же масштабных натурных экспериментов по анализу транспортных потоков ограничено рядом причин: необходимость обеспечения безопасности движения; материальные и трудовые затраты на проведение эксперимента; проведение эксперимента затрагивает интересы большого количества людей – участников дорожного движения. Необходимость использования методов моделирования обусловлена, прежде всего, самой проблемой анализа транспортной системы.

В использовании математических методов есть свои слабые стороны. Моделирование какого-либо процесса или явления может привести к очень сложной математической задаче, которую современные инструментальные средства математики решить уже не могут. Возникает необходимость в упрощении модели. В задачу вводятся некоторые допущения, которые могут сказаться на качестве полученных результатов. Иногда этот процесс приводит к парадоксальным ситуациям, когда на каком-то этапе

формализации задачи происходит существенное усложнение алгоритма и повышение детализации задачи, а на последующем этапе, например, из-за невозможности решения нелинейных форм модели, происходит обратный процесс, связанный с существенным упрощением и огрублением задачи в ходе её линеаризации.

В любом случае модель – это упрощенное формальное описание существующих явлений. Модели, как правило, позволяют выявить особенности функционирования объекта исследования и на основе этого прогнозировать поведение объекта при изменении каких-либо параметров (исходных данных).

При моделировании любой проблемы главное требование – модель должна быть адекватна действительности, т.е. соответствовать реальности. От этого зависит качество выводов, полученных по моделям.

Проверка адекватности модели проводится опытным путем, результаты, полученные по модели, сравнивают с действительными данными. В связи с этим, при использовании математических методов и моделей принято строить несколько моделей с разными критериями, условиями, допущениями, а затем проверять их на адекватность.

В основе исследований по распределению транспортного спроса на перевозки по территории города лежит информация о спросе на передвижения и информация о возможностях улично-дорожной сети (УДС). Матрица корреспонденций характеризует спрос на передвижение. Этот спрос может быть выражен количеством людей, которым необходимо переместиться из одного пункта в другой.

### 1.2.2.1. Задача распределения транспортного спроса

Проведем построения на основе изложенных в [1] подходов к дискретизации объектов исследования – транспортной системы и территории города. Город разделили на  $n$  транспортных районов естественным путем (компактное проживание людей, границы в виде рек, рвов, железных дорог, крупных магистралей). Номер района  $t = 1, 2, \dots, n$ . Выделены произвольным образом области исследования. Номер области  $r = 1, 2, \dots, E$ . Известны координаты центров транспортных районов, координаты вершин каждой области исследования. Определена матрица корреспонденций между районами  $K = (k_{jt})$ , характеризующая спрос на передвижения. Определена предельно допустимая экологическая нагрузка в каждой области  $D_r$ . На основе вышеизложенного определена сумма долей всех корреспонденций, проходящих через область исследования ( $I_{rs}$ ) и транспортная зависимость области ( $G_{rs}$ ) с учетом типа прохождения маршрута.

Рассматриваются три способа передвижения:

- Передвижения пешком;

- Передвижения на городском пассажирском транспорте общего пользования (ОТ);

- Передвижения на индивидуальном транспорте (ИТ).

Требуется распределить все количество людей из матрицы корреспонденций по различным способам передвижения в исследуемых областях для каждого типа прохождения маршрута с целью получения минимума затрат суммарного времени всеми участниками движения.

В модели предлагаются следующие ограничения:

- По спросу на передвижение в исследуемых областях;
- По предельной экологической нагрузке в исследуемых областях;
- По транспортному предложению в исследуемых областях.

Обозначим:

$X_{rs1}$  – количество людей, передвигающихся в области  $r$  по типу  $s$  пешком;

$X_{rs2}$  – количество людей, передвигающихся в области  $r$  по типу  $s$  на ОТ;

$X_{rs3}$  – количество людей, передвигающихся в области  $r$  по типу  $s$  на ИТ;

$S$  – количество типов пересечения в области исследования .

Таким образом, для конкретной области исследования  $r$  будет 9 переменных:

$X_{r11}$  – количество людей, передвигающихся по типу 1 (транзит) пешком;

$X_{r21}$  – количество людей, передвигающихся по типу 2 (въезд/выезд) пешком;

$X_{r31}$  – количество людей, передвигающихся по типу 3 (внутри области) пешком;

$X_{r12}$  – количество людей, передвигающихся по типу 1 (транзит) на ОТ и т.д.

Ограничения по спросу на перемещение в исследуемых областях будут иметь следующий вид:

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3} \geq G_{rs}, \quad (1.1)$$

где  $l_{rs}$  – сумма долей всех корреспонденций, проходящих через область исследования  $r$  по типу  $s$  (км);

$G_{rs}$  – транспортная зависимость области  $r$  по типу  $s$  (чел/км).

Обозначим:

$a_1$  – количество энергии, требуемое на перемещение одного человека на 1 км пешком ( $a_1 = 0$ );

$a_2$  – количество энергии, требуемое на перемещение одного человека на 1 км на ОТ (Дж/км/чел);

$a_3$  – количество энергии, требуемое на перемещение одного человека на 1 км на ИТ (Дж/км/чел).

Тогда экологические ограничения на передвижения по исследуемым областям будут иметь следующий вид:

$$a_1 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs1} + a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \leq D_r, \quad (1.2)$$

где  $D_r$  – предельная экологическая нагрузка в области  $r$  (Дж).

Существует понятие плотности транспортного потока – это число автомобилей, занимающих единицу длины полосы движения проезжей части дороги, при условии непрерывного движения. В качестве единицы длины возьмем 1 км. Число автомобилей пересчитаем на количество людей по среднему количеству людей в одном автомобиле и получим количество людей, занимающих 1 км полосы движения проезжей части дороги при движении на различных видах транспорта.

Пусть  $K_2$  – количество людей, занимающих 1 км длины проезжей части при движении на ОТ;  $K_3$  – количество людей, занимающих 1 км длины проезжей части при движении на ИТ.

Тогда ограничения по наличию дорог имеют вид:

$$\frac{1}{k_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{k_3} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, \quad (1.3)$$

где

$L_r$  – суммарная длина проезжих частей дорог в области .

Пусть:

$v_1$  – средняя скорость перемещения одного человека пешком на 1 км (км/час);

$v_2$  – средняя скорость перемещения одного человека на ОТ на 1 км (км/час);

$v_3$  – средняя скорость перемещения одного человека на ИТ на 1 км (км/час);

Примем в качестве критерия оптимизации общее время совершения корреспонденций. Тогда целевая функция будет иметь вид:

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{v_1} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs1} + \frac{1}{v_2} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs2} + \frac{1}{v_3} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \rightarrow \min \quad (1.4)$$

### Модель оптимального распределения транспортного спроса

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{v_1} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs1} \cdot \frac{1}{v_2} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs2} \cdot \frac{1}{v_3} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \rightarrow \min \quad (1.5)$$

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3} \geq G_{rs}, r = 1, 2, \dots, E, s = 1, 2, 3 \quad (1.6)$$

$$a_1 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs1} + a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \leq D_r, \quad (1.7)$$

$$r = 1, 2, \dots, E;$$

$$\frac{1}{k_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{k_3} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, r = 1, 2, \dots, E \quad (1.8)$$

$$X_{rs1} \geq 0, X_{rs2} \geq 0, X_{rs3} \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, E, s = 1, 2, 3 \quad (1.9)$$



Модель оптимального распределения спроса (1.5) – (1.9) позволяет для любых произвольно выбранных областей исследования найти, как распределяется существующий спрос на передвижения между транспортными районами по выбранным областям исследования с учетом способа передвижения (пешком, ОТ, ИТ) и типа прохождения маршрута через исследуемые области (транзит, въезд/выезд, внутри области)  $X_{rs1}, X_{rs2}, X_{rs3}$ . При этом поставлена цель – минимум затрат времени всех участников движения по всем маршрутам.

### 1.2.2.2. Задача распределения транспортного предложения

При таком подходе целевой функцией будет выступать *суммарная скорость передвижения в транспортной сети* всех участников дорожного движения всеми видами транспорта на всей исследуемой области. А неизвестными будет выступать количество транспортных средств различного назначения и эксплуатационных параметров, реализующих имеющийся на территории города транспортный спрос.

Обозначим:

$X_{rs1}$  – количество людей, передвигающихся в области  $r$  по типу  $s$  пешком;

$X_{rs2}$  – количество транспортных средств ОТ, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$X_{rs3}$  – количество транспортных средств ИТ, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$S$  – количество типов прохождения маршрутов в области исследования ( $S = 3$ ).

Таким образом, для конкретной области исследования  $r$  будет 9 переменных:

$X_{r11}$  – количество людей, передвигающихся по типу 1 (транзит) пешком;

$X_{r21}$  – количество людей, передвигающихся по типу 2 (въезд/выезд) пешком;

$X_{r31}$  – количество людей, передвигающихся по типу 3 (внутри области) пешком;

$X_{r12}$  – количество транспортных средств ОТ, перевозящих пассажиров по типу 1 (транзит); и т.д.

Вместо коэффициентов  $k_i$  используем следующие параметры:

$w_2$  – среднее количество человек, перевозимых на одном транспортном средстве ОТ (иначе - средняя вместимость транспортного средства);

$w_3$  – среднее количество человек, перевозимых на одном транспортном средстве ИТ.

Тогда ограничения по спросу на перемещение в исследуемых областях будут иметь следующий вид:

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} \cdot w_2 + l_{rs} \cdot X_{rs3} \cdot w_3 \geq G_{rs} \quad (1.10)$$

Где  $l_{rs}$  - сумма долей всех корреспонденций, проходящих через область

исследования  $r$  по типу  $s$  (км).

$G_{rs}$  – транспортная зависимость области  $r$  по типу  $s$  (чел·км).

Также обозначим:

$a_2$  – пробеговые выбросы загрязняющих веществ единицей подвижного состава ОТ (г/км);

$a_3$  – пробеговые выбросы загрязняющих веществ единицей подвижного состава ИТ (г/км);

Тогда экологические ограничения на передвижения по исследуемым областям будут иметь следующий вид:

$$a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \leq D_r, \quad (1.11)$$

где  $D_r$  – предельная суточная эмиссия загрязняющих веществ в области  $r$  (грамм).

Для определения ограничений по УДС количество участков улично-дорожной сети всего города обозначим  $m$ . Длину  $i$ -го участка сети в области исследования  $r$  обозначим  $d_{ri}$ . Количество полос, соответствующее  $i$ -ому участку, обозначим  $k_i$ . Тогда для области исследования  $r$  можно посчитать суммарную длину всех полос движения проезжих частей улиц и дорог области исследования:

$$l_r = \sum_{i=1}^m d_{ri} \cdot k_i \quad (1.12)$$

Далее требуется рассчитать плотность транспортного потока при непрерывном движении со скоростью движения конкретного вида транспорта. При расчете плотности транспортного потока важен динамический габарит автомобиля, который зависит от времени реакции водителя и тормозных качеств транспортных средств. Динамический габарит автомобиля  $L_o$  включает в себя длину автомобиля  $l_a$  (м) и дистанцию безопасности  $d$  (м).

Подробный расчет динамического габарита автомобиля описан в [1]. В данной работе будем учитывать, что дистанция безопасности между движущимися автомобилями будет рассчитываться следующим образом:

$$d = c \cdot t + \frac{c^2}{2} \left( \frac{1}{j_2} - \frac{1}{j_1} \right) \quad (1.13)$$

где  $c$  – скорость движения транспортного потока (м/сек);  $t$  – время реакции водителя (с),  $j_i$  – замедление  $i$ -го автомобиля (м/с<sup>2</sup>).

Если транспортное средство движется непрерывно со скоростью  $c$ , то на улично-дорожной сети оно занимает  $L_o$  метров проезжей части. Тогда на

1 км проезжей части приходится  $p = \frac{1000}{L_o}$  (авто/км), параметр  $p$  назовем –

максимальная плотность транспортного потока, движущегося с заданным

значением скорости  $c$ .

Для каждого вида подвижного состава можно рассчитать свою плотность транспортного потока, таким образом обозначим:

$p_2$  – плотность транспортного потока ОТ при скорости  $c_2$  (авто/км);

$p_3$  – плотность транспортного потока ИТ при скорости  $c_3$  (авто/км).

Тогда ограничения по транспортному предложению для области исследования имеют вид:

$$\frac{1}{p_2} \cdot \sum_{s=1}^3 x_{rs2} + \frac{1}{p_3} \cdot \sum_{s=1}^3 x_{rs3} \leq L_r \quad (1.14)$$

где  $L_r$  – суммарная длина всех полос движения проезжих частей улиц и дорог в области  $r$ .

В процессе создания транспортных моделей проводятся натурные замеры различных параметров транспортных потоков. Одним из таких параметров является скорость транспортного потока. Обследования скоростных характеристик проводятся для различных видов транспорта. Так для каждого вида транспорта получены значения средней скорости движения транспортного потока. В поставленной оптимальной модели натурные данные скоростных параметров транспортных потоков обозначим следующим образом:

$v_1$  – средняя скорость перемещения одного человека пешком (км/ч);

$v_2$  – средняя скорость движения транспортных средств ОТ (км/ч);

$v_3$  – средняя скорость движения ИТ (км/ч).

Тогда целевая функция максимизации суммарной скорости перемещения всех участников движения будет иметь вид:

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 (v_1 \cdot X_{rs1} + v_2 \cdot X_{rs2} \cdot w_2 + v_3 \cdot X_{rs3} \cdot w_3) \rightarrow \max \quad (1.15)$$

### Модель оптимального распределения транспортного предложения

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 (v_1 \cdot X_{rs1} + v_2 \cdot X_{rs2} \cdot w_2 + v_3 \cdot X_{rs3} \cdot w_3) \rightarrow \max \quad (1.16)$$

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} \cdot w_2 + l_{rs} \cdot X_{rs3} \cdot w_3 \geq G_{rs}, r = 1, 2, \dots, E, s = 1, 2, 3 \quad (1.17)$$

$$a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \leq D_r, r = 1, 2, \dots, E \quad (1.18)$$

$$\frac{1}{p_2} \cdot \sum_{s=1}^3 x_{rs2} + \frac{1}{p_3} \cdot \sum_{s=1}^3 x_{rs3} \leq L_r, r = 1, 2, \dots, E \quad (1.19)$$

$$X_{rs1} \geq 0, X_{rs2} \geq 0, X_{rs3} \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, E, s = 1, 2, 3 \quad (1.20)$$

С учетом постановки математических моделей, изложенных в [1], следует заметить, что поставлены две структурно симметричные математические модели. Различие этих моделей в том, что мы находим перераспреде-

ление транспортного спроса и транспортного предложения по территории города в разных размерностях. В первой задаче в качестве неизвестных находим людей, которые перемещаются на различных видах транспорта. Во второй задаче определяем требуемое количество транспортных средств, которые перевозят людей. Так же поменялась целевая функция: в первой задаче – минимизация времени реализации всех транспортных корреспонденций, во второй – максимизация суммарной скорости перемещения всех участников движения. Как уже отмечалось, это пример двойственности в экстремальных задачах, в том числе в задачах математического программирования.

Суть постановки задачи не изменилась, как и формулировка всей модели, стали другими параметры, постоянные для каждой конкретной задачи. Различия могут быть только в том, для каких целей мы ищем решение в том или ином виде.

### **1.3. Построение математической модели оптимизационной задачи**

Математическая модель оптимизационной задачи представляет собой линейную модель задачи математического программирования. Модель состоит из трех обязательных элементов:

- Целевой функции;
- Системы линейных неравенств (ограничений);
- Условия неотрицательности переменных.

#### **1.3.1. Задание степеней свободы оптимальной модели. Выбор переменных**

Задание степеней свободы является решающим шагом при построении любой математической модели. От этого шага зависит полнота и адекватность модели, с одной стороны, и скорость, и удобство работы с моделью, с другой стороны. При построении математической модели будем ориентироваться на поставленную выше задачу нахождения оптимального распределения транспортного спроса по территории города. Как это следует из постановки задачи, в качестве неизвестных в модели будут выступать корреспонденции людей. Корреспонденции будем искать в суточном (дневном) цикле. Все корреспонденции всех жителей города будем искать в зависимости от:

- зоны (территории города), в которой совершается корреспонденция;
- способа реализации корреспонденции;
- типа реализации корреспонденции.

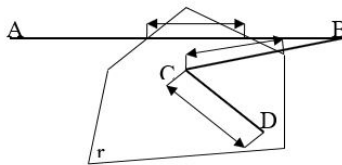
Строить и решать модель формирования эффективной транспортной

системы крупного города в первом приближении будем для трех способов передвижений:

- пешком;
- на общественном транспорте;
- на индивидуальном транспорте;

Каждый из способов перемещений в каждой зоне будет рассматриваться в зависимости от типа перемещения (рис. 1.2):

- АВ – транзит;
- ВС – въезд в зону;
- CD – внутреннее движение в зоне.



**Рис. 1.2.** Схема типов перемещения для каждой зоны

Требуется распределить все количество людей из матрицы корреспонденций по различным способам передвижения в исследуемых областях для каждого типа прохождения маршрута, с целью получения минимума затрат суммарного времени всеми участниками движения.

Для постановки модели оптимизационной задачи введем следующие искомые переменные:

$X_{rs1}$  – количество людей, передвигающихся в области по типу  $s$  пешком;

$X_{rs2}$  – количество транспортных средств ОТ, работающих в области  $г$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$X_{rs3}$  – количество транспортных средств ИТ, работающих в области  $г$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$S$  – количество типов прохождения маршрутов в области исследования ( $S = 1, 2, 3$ ).

Таким образом, для конкретной области исследования  $г$  будет 9 переменных:

$X_{r11}$  – количество людей, передвигающихся по типу 1 (транзит) пешком;

$X_{r21}$  – количество людей, передвигающихся по типу 2 (въезд/выезд) пешком;

$X_{r31}$  – количество людей, передвигающихся по типу 3 (внутри области) пешком;

Итого: для всей области исследования (10-и транспортных зон) модель будет иметь 90 степеней свободы. Задача решения математической модели будет заключаться в отыскании лучшего набора значений всех 90 переменных. При таком выборе неизвестных и степеней свободы поставленная ма-

тематическая модель оптимизационной задачи будет решать задачу распределения транспортного спроса между видами транспорта.

Поставленную задачу, а значит и математическую модель, можно существенно усложнить и расширить, например, разделив переменные, отвечающие за перемещения на ОТ, на виды подвижного состава ОТ, такие как маршрутные автобусы малого, среднего и большого класса, трамвай, троллейбус. Кроме того, можно ввести в модель в качестве переменных внеуличные системы транспорта.

Для этого количество транспортных средств ОТ –  $X_{rs2}$  необходимо разбить по видам подвижного состава:

$X_{rs21}$  – количество автобусов малого класса, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$X_{rs22}$  – количество автобусов среднего класса, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$X_{rs23}$  – количество автобусов большого класса, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$X_{rs24}$  – количество троллейбусов, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ ;

$X_{rs25}$  – количество трамваев, работающих в области  $r$  и перевозящих пассажиров по типу  $s$ .

Разумеется, что для каждого вида подвижного состава должны быть заданы основные эксплуатационные характеристики транспортного средства, такие как скорость и вместимость, а также основные параметры, участвующие в расчете ограничений на целевую функцию.

Средняя вместимость транспортного средства будет задана следующими параметрами:

$w_{21}$  – среднее количество человек, перевозимых на одном автобусе малого класса;

$w_{22}$  – среднее количество человек, перевозимых на одном автобусе среднего класса;

$w_{23}$  – среднее количество человек, перевозимых на одном автобусе большого класса;

$w_{24}$  – среднее количество человек, перевозимых на одном троллейбусе;

$w_{25}$  – среднее количество человек, перевозимых на одном трамвае.

Расход топлива каждой единицей подвижного состава ОТ (л/км) разделится по видам транспорта:

$a_{21}$  – расход топлива единицей подвижного состава автобусов малого класса (л/км);

$a_{22}$  – расход топлива единицей подвижного состава автобусов среднего класса (л/км);

$a_{23}$  – расход топлива единицей подвижного состава автобусов большого класса (л/км).

Плотность транспортного потока рассматриваемых видов транспорта будет зависеть от габаритов единиц подвижного состава и скорости перемещения того или иного вида транспорта:

$p_{21}$  – плотность транспортного потока автобусов малого класса, движущихся со скоростью  $c_{21}$  (авто/км);

$p_{22}$  – плотность транспортного потока автобусов среднего класса, движущихся со скоростью  $c_{22}$  (авто/км);

$p_{23}$  – плотность транспортного потока автобусов большого класса, движущихся со скоростью  $c_{23}$  (авто/км).

Следует при этом иметь в виду, что даже при таком незначительном повышении детализации математической модели количество степеней её свободы почти удвоится и будет равняться 162. В дальнейшем следует ожидать соответствующего повышения требований к алгоритмам и инструментам поиска решения модели, увеличения времени нахождения решения и снижения точности результатов.

### 1.3.2. Формирование целевой функции оптимальной модели

Для построения целевой функции требуется задание эксплуатационных параметров систем транспорта, а также расчета объемов этих перемещений в километрах для каждой зоны.

Обозначим:

$v_k$  – средняя скорость движения транспортного средства типа  $k$ .

Пусть известно, что:

$v_1$  – средняя скорость перемещения одного человека пешком (км/ч);

$v_2$  – средняя скорость перемещения одного человека на ОТ (км/ч);

$v_3$  – средняя скорость перемещения одного человека на ИТ (км/ч);

$l_{rs}$  – средневзвешенная по количеству людей длина доли корреспонденций, проходящих через зону  $r$  по типу  $s$ , км,

$$l_{rs} = \frac{\sum_{i,j} l_{ijrs} k_{ijrs}}{\sum_{i,j} k_{ijrs}} \quad (1.21)$$

где  $l_{ijrs}$  – длина доли корреспонденций из района  $i$  в район  $j$ , проходящих через зону  $r$  по типу  $s$ , км;  $k_{ijrs}$  – количество корреспонденций из района  $i$  в район  $j$ , проходящих через зону  $r$  по типу  $s$  в сутки, чел.

Тогда целевая функция будет иметь вид:

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{v_1} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs1} \cdot \frac{1}{v_2} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs2} \cdot \frac{1}{v_3} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \rightarrow \min \quad (1.22)$$

где

$E$  – количество транспортных зон.

В такой постановке целевой функции целевой показатель функционирования транспортной системы – минимум средневзвешенного времени реализации транспортных корреспонденций всеми участниками движения в течение суток.

### **1.3.3. Формирование системы ограничений математической модели оптимизационной задачи**

#### **1.3.3.1. Структурная схема ограничений оптимальной модели**

В качестве набора ограничений, накладываемых на целевую функцию, будем использовать четыре типа ограничений:

- по протяженности существующей улично-дорожной сети;
- по спросу на перемещение в исследуемых областях;
- по выбросам загрязняющих веществ;
- по рискам возникновения ДТП;
- по имеющемуся подвижному составу;
- по уровню шума.

Структурная схема ограничений математической модели оптимизационной задачи приведена на рисунке 1.3.

По аналогии с постановкой задачи представим логико-графическую модель способов формирования ограничений математической модели оптимизационной задачи. Модель представлена на рисунке 1.4.

По смыслу все вводимые ограничения можно разбить по виду правой части на фактические и планируемые. Фактические ограничения связаны с существующим состоянием транспортной системы – существующим спросом, инфраструктурой, подвижным составом. Все эти параметры фиксированы и при этом хорошо формализованы. Они составляют информационную основу всех транспортных моделей.

В свою очередь, планируемые ограничения – это те ограничения, правая часть которых не является строго формализованной. Кроме того, они не фиксированы и позволяют функционировать транспортной системе города в широком диапазоне своих изменений. К таким ограничениям можно отнести ограничение по уровню шума на территории, экологическое ограничение, ограничение по рискам ДТП.

Планируемые ограничения есть результат планирования качества жизни в городе как некие условия функционирования транспортной системы. Их можно задать жесткими, добиваясь выполнения высоких показателей качества функционирования транспорта в рамках природно-технической системы. Например, задать цель – добиться выполнения требований по качеству атмосферного воздуха, либо соблюдения предельно допустимых уровней шума во всех жилых помещениях города, либо недопущения ги-



бели людей в ДТП. В результате следует ожидать, что оптимальной при таких ограничениях станет транспортная система, не предоставляющая ожидаемых сообществом временных показателей скорости удовлетворения транспортных потребностей.

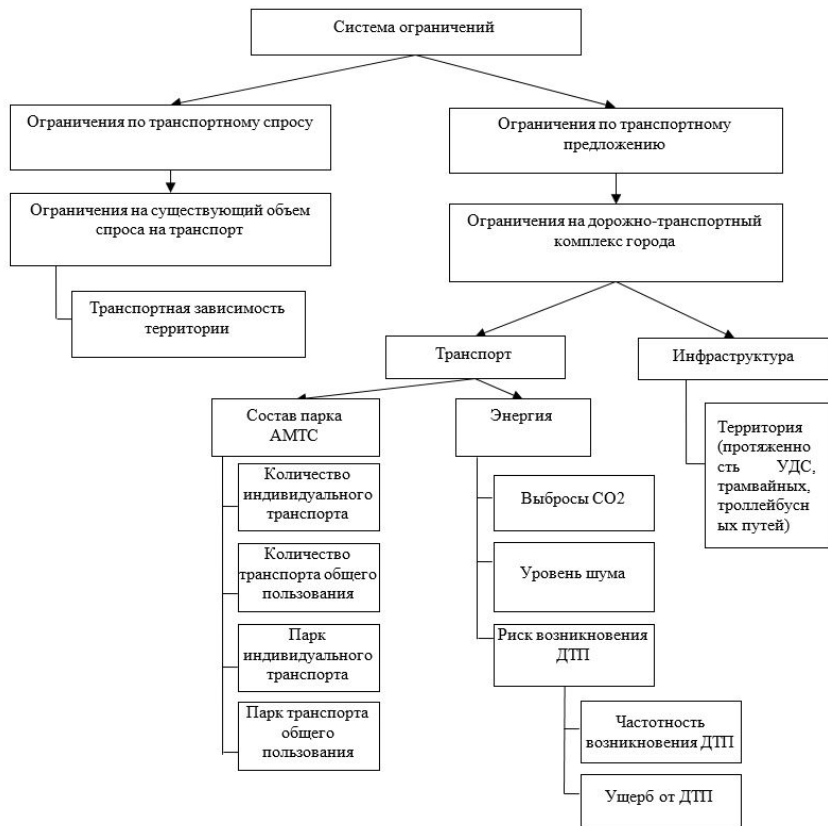


Рис. 1.3. Структурная схема ограничений математической модели

Следует заметить, что параметры предельно допустимого уровня шума на территории и предельный уровень загрязнения атмосферного воздуха нормируются, и их значения зафиксированы в соответствующих нормативных документах. С другой стороны, не существует нормативно установленного уровня предельного риска ДТП. Сообщество жителей города скорее определяет для себя «приемлемый» на определенном этапе развития риск ДТП и смерти в них людей.



**Рис. 1.4.** Логико-графическая модель способов постановки ограничений математической модели оптимизационной задачи

Представляется целесообразным для планируемых ограничений при их формировании задаться принципом неухудшения существующей ситуации. Такие ограничения контролировали бы поддержание параметров качества жизни в городе, относящиеся к природе каждого ограничения, на фиксированном уровне, наблюдаемом в настоящее время.

Термин «неухудшение ситуации» следует применять не к отдельным территориям, на которых эта ситуация может быть зафиксирована, а к среднему состоянию качества природной среды по отношению к одному жителю города. Иными словами, эффективность функционирования транспортной системы города должна доставлять минимум времени, затрачиваемого на реализацию корреспонденций, в пересчете на одного жителя, при сохранении общего среднего объема своего негативного влияния также на него. При рассмотрении всей территории города нетрудно заметить, что жители центральных районов города находятся больше времени на территориях с большими уровнями ингредиентного и параметрического загрязнения окружающей среды. Жители отдаленных районов испытывают меньшее негативное воздействие от функционирования городской транспортной системы как по абсолютной величине уровня загрязнения среды, так и по времени воздействия.

Целевая функция математической модели эффективной транспортной системы определяет суммарное время всех транспортных корреспонден-

ций всех жителей города. В связи с этим логично и ограничения, накладываемые на развитие транспортной системы, относить к среднему уровню воздействия, приходящегося на одного жителя.

Загрязнения атмосферного воздуха на отдельных городских территориях оказывает постоянное вредное воздействие на организм человека. Это воздействие определяется физиологическими процессами, происходящими в организме человека, в частности с дыханием. Как частота дыхания человека, являясь практически неизменной в течение всего дня (в течение всей жизни), так и уровень вреда от воздействия загрязненной атмосферы также постоянен в течение дня. Иначе обстоит дело с шумом.

Представляется целесообразным шумовые ограничения в математической модели строить исходя из времени шумового воздействия на человека и времени суток, в течение которого это воздействие осуществлялось. Возможен аналогичный подход к постановке ограничений на загрязнение атмосферного воздуха.

При постановке ограничений по риску ДТП территория города, где этот риск можно ограничивать, неважна. Риск ДТП связан с собственно передвижениями человека, которые, в свою очередь, осуществляются по территории города согласно модели транспортного спроса. При нахождении человека в местах проживания либо на рабочем месте риск стать участником дорожного движения равен нулю. Предельные риски ДТП будут определяться в расчете на одного жителя города. Для этого требуется на основе существующей статистики ДТП и натуральных данных об интенсивности транспортных, пассажирских и пешеходных потоков определить существующие предельные значения ущерба от ДТП и частотности возникновения ДТП в расчете на одного жителя города.

С этой целью потребуется рассматривать отдельно по каждой зоне предельную пропускную способность полосы движения. Различные по величине пропускные способности полос движения для каждой из рассматриваемых зон определены в результате анализа результатов расчета теоретической пропускной способности полосы движения в зонах с учетом технических средств организации и регулирования дорожного движения.

Вред, оказываемый каждому жителю города со стороны функционирующей в городе транспортной системы, можно ограничить абсолютными показателями, измеряемыми в Вт\*ч шума и граммах загрязняющих веществ выбросов автомобильного транспорта, попавших в легкие человека. Для постановки ограничений требуется провести ряд дополнительных исследований:

1. Исследовать уровни шума и загрязнения атмосферного воздуха выбросами автомобильного транспорта:

- a. Построить картограмму уровня шума на территории города.
- b. Построить картограмму загрязнения атмосферного воздуха города

выбросами автомобильного транспорта.

2. Построить зависимости уровня шума на территории города в течение суток (в течение дня, вечера, ночи).

3. Определить количество людей, находящихся в каждой исследуемых зонах в течение трех периодов суток.

4. Найти объем среднего вреда, приходящегося на одного человека, получаемого им в течение суток от функционирования транспортной системы (в Вт\*час шумового воздействия и в граммах ЗВ).

5. Найти предельное значение вреда (правую часть ограничений) в зависимости от количества людей, пребывающих в зоне в течение дня, и умноженного на средний вред по городу за период.

6. Для постановки ограничений по предельным рискам ДТП необходимо определить расчетную пропускную способность полосы движения для каждой из зон.

На основании проведения транспортного анализа городской территории разделим территорию города на 10 транспортных зон –  $r = 1, 2, \dots, 10$  (рис. 1.5). Все зоны сгруппируем в четыре типа:

1) Городской центр (зона 1). Для зон данного типа характерна максимальная деловая активность.

2) Центральные районы, прилегающие к городскому центру (зоны 2-5). Для зон данного типа характерна преобладающая высотная застройка и многофункциональное использование территории.

3) Удаленные районы (зоны 6-8). Зоны данного типа имеют собственные центры деловой и социальной активности. Перспектива – преобразование данных участков в самостоятельные поселения и их автономизация.

4) Обширные участки с низкой плотностью населения (малоэтажные строения) (зоны 9, 10).

Далее для этих зон будем назначать необходимые ограничения и искать оптимальные объемы перемещений различными видами транспорта и различными способами.

### 1.3.3.2. Ограничение по транспортному спросу

Смысл введения ограничений по транспортному спросу определен назначением транспортной системы. Основным и самым главным условием эффективного функционирования системы является полное удовлетворение имеющегося на территории транспортного спроса. Ограничения по транспортному спросу определены через транспортную зависимость территории, которая определяет объем существующего транспортного спроса на территории. Этот объем представляет собой так называемые «нижние» ограничения в модели функционирования транспортной системы, связанные с существующим транспортным спросом. Структурная схема поста-

новки ограничений по транспортному спросу представлена на рисунке 1.6. При постановке ограничений используется понятие «транспортная зависимость территории».

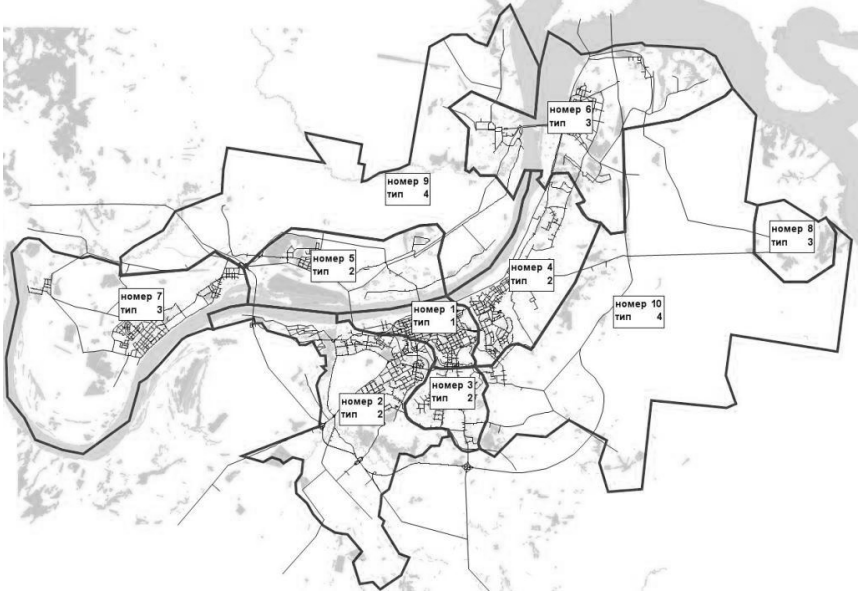


Рис. 1.5. Границы исследуемых зон в российском городе с населением 1 млн жителей на примере города Перми

### 1.3.3.2.1. Постановка ограничения по спросу на перемещение в исследуемых областях в общем виде

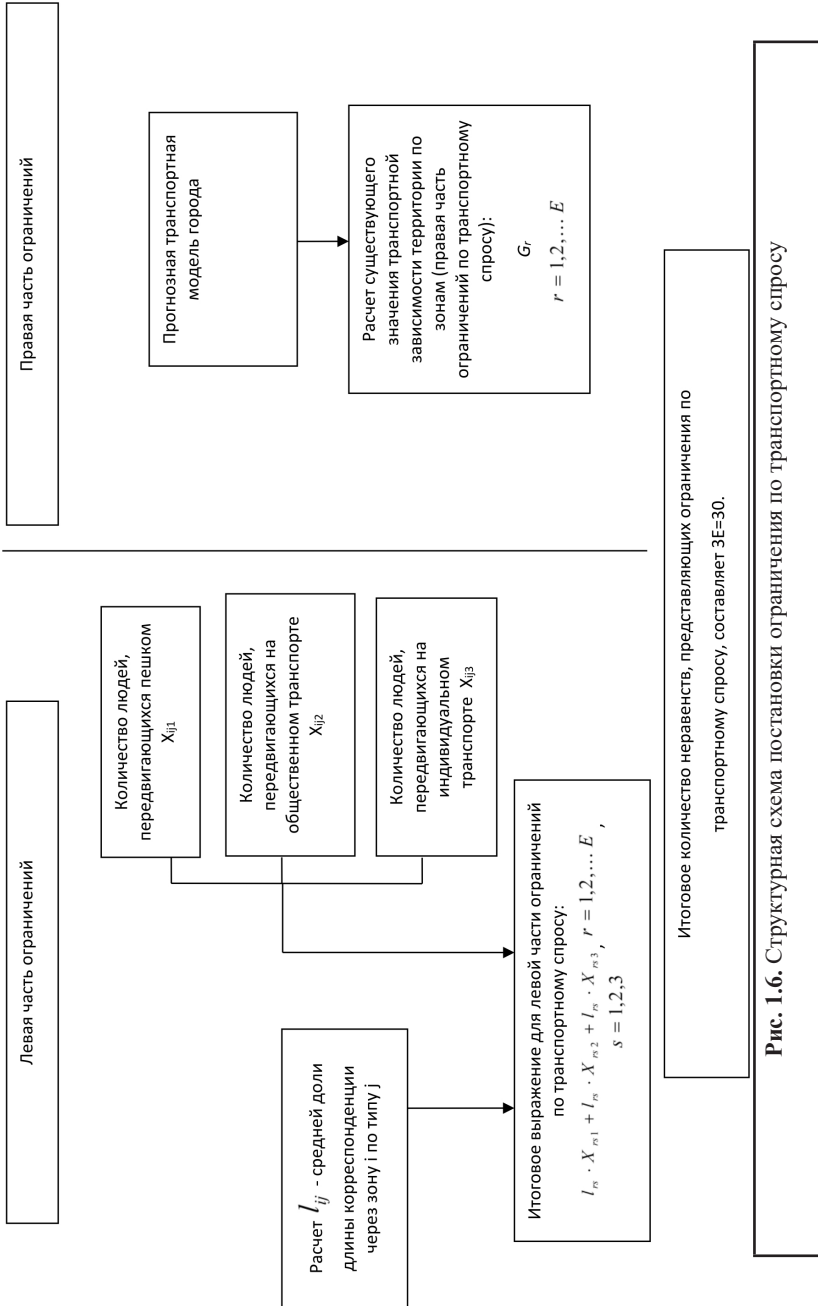
Ограничения по спросу на перемещение в исследуемых областях будут иметь следующий вид:

$$f(X_{rsk}, l_{rs}) \geq G_{rs} \quad (1.24)$$

где

$l_{rs}$  – средневзвешенная по количеству людей длина доли корреспонденций, проходящих через зону  $r$  по типу  $s$  (км);  $X_{rsk}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$  в сутки, чел,  $f(X_{rsk}, l_{rs})$  – есть некоторая функция от вышеуказанных параметров, характеризующая объем перемещений;  $G_{rs}$  – транспортная зависимость области исследования  $r$  по типу  $s$  в сутки, чел. км.

Причем функция  $f$  должна быть предпочтительно линейного вида относительно переменных  $X_{rsk}$ .



**Рис. 1.6.** Структурная схема постановки ограничения по транспортному спросу

### 1.3.3.2.2. Постановка левой части ограничения

Левая часть ограничения будет иметь следующий вид:

$$f(X_{rsk}, l_{rs}) = l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3} \quad (1.25)$$

где  $l_{rs}$  – среднее значение длин долей всех корреспонденций, проходящих через область исследования  $r$  по типу  $s$  (км);

$X_{rsk}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$  в сутки, чел.

Типы длин долей корреспонденций  $l_{rs}$  изображены на рисунке 1.7.

$l_{rs}$  рассчитывается как:

$$l_{rs} = \frac{\sum_{i,j} l_{ijrs} k_{ijrs}}{\sum_{i,j} k_{ijrs}} \quad (1.26)$$

где  $l_{rs}$  – средневзвешенная по количеству людей длина доли корреспонденций, проходящих через зону  $r$  по типу  $s$ , км,

$l_{ijrs}$  – длина доли корреспонденций из района  $i$  в район  $j$ , проходящих через зону  $r$  по типу  $s$ , км (рисунок 1.7);

$k_{ijrs}$  – количество корреспонденций из района  $i$  в район  $j$ , проходящих через зону  $r$  по типу  $s$  в сутки, чел.

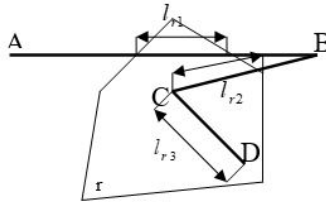


Рис. 1.7. Типы прохождения корреспонденций через зону

### 1.3.3.2.3. Постановка правой части ограничения

В качестве правой части ограничения по спросу на перемещение в исследуемых областях используется значение параметра транспортной зависимости территории для исследуемой зоны  $G_{rs}$ . Подробнее методика расчета параметра  $G_{rs}$  описана в [1].

**1.3.3.2.4. Постановка ограничения по спросу на перемещение в исследуемых областях для модели российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми**

Значения параметров  $G_{rs}$  и  $l_{rs}$  для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми получены из прогнозной транспортной модели города Перми и приведены в таблицах 1.2 и 1.3.

Таблица 1.2

**Значения параметров  $G_{rs}$  для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми**

Номер зоны	Тип прохождения	$G_{rs}$ , чел·км	Переменная правой части
1	AB	519 339,74	$G_{11}$
	BC	1 716 040,70	$G_{12}$
	CD	158 831,35	$G_{13}$
2	AB	858 295,45	$G_{21}$
	BC	2 988 937,70	$G_{22}$
	CD	894 427,16	$G_{23}$
3	AB	168 594,20	$G_{31}$
	BC	1 263 217,21	$G_{32}$
	CD	113 051,18	$G_{33}$
4	AB	395 748,50	$G_{41}$
	BC	1 831 469,25	$G_{42}$
	CD	433 986,51	$G_{43}$
5	AB	576 649,42	$G_{51}$
	BC	1 495 145,96	$G_{52}$
	CD	129 690,90	$G_{53}$
6	AB	244 201,37	$G_{61}$
	BC	1 405 037,59	$G_{62}$
	CD	520 286,20	$G_{63}$
7	AB	166 619,34	$G_{71}$
	BC	1 352 256,44	$G_{72}$
	CD	688 103,26	$G_{73}$
8	AB	0,00	$G_{81}$
	BC	382 821,44	$G_{82}$
	CD	0,10	$G_{83}$



Номер зоны	Тип прохождения	$G_{rs}$ , чел-км	Переменная правой части
9	AB	859 473,78	$G_{91}$
	BC	398 349,97	$G_{92}$
	CD	5 012,87	$G_{93}$
10	AB	1 515 830,25	$G_{10-1}$
	BC	238 742,42	$G_{10-2}$
	CD	4 930,00	$G_{10-3}$

Таблица 1.3

**Значения параметров  $l_{rs}$  для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми**

Номер зоны	Доли длин транзитных корреспонденций $lr1$ , км	Доли длин пограничных корреспонденций $lr2$ , км	Доли длин внутренних корреспонденций $lr3$ , км
1	6,70	4,37	1,82
2	9,80	5,77	3,47
3	7,12	4,50	2,08
4	10,12	5,63	2,73
5	12,48	7,88	4,16
6	15,17	8,10	3,87
7	20,72	9,43	3,46
8	0,10	14,45	0,10
9	14,87	5,94	3,05
10	11,23	5,92	5,31

Приведенные в таблицах 1.2 и 1.3 значения коэффициентов правой и левых частей ограничений по транспортному спросу будут использованы при построении математической модели оптимизационной задачи для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми.

### 1.3.3.3. Ограничение по протяженности существующей УДС

Ограничение по протяженности существующей улично-дорожной сети (УДС) является территориальными ограничением на существующее транспортное предложение. Данное ограничение определяет предложение дорожно-транспортного комплекса с точки зрения возможности удовлетворения имеющегося транспортного спроса. Использование данного ограни-

чения в постановке оптимизационной задачи связано с тем, что территория – один из важнейших ресурсов в условиях города. В качестве ограничения будет использоваться существующая протяженность УДС города. В связи с этим, ограничение по протяженности УДС – единственное жесткое ограничение в оптимизационной задаче. Параметры УДС любого города хорошо формализованы и являются основой при формировании графа сети в построении прогнозных транспортных моделей.

Структурная схема постановки ограничения по протяженности существующей улично-дорожной сети представлена на рисунке 1.8. При постановке данного ограничения используются такие понятия, как: плотность транспортного потока и средняя вместимость транспортного средства.

### 1.3.3.3.1. Постановка ограничения по протяженности существующей УДС в общем виде

Ограничение по транспортному предложению для области исследования имеет вид:

$$f(X_{rsk}, p_k, w_k) \geq L_r \quad (1.27)$$

где  $p_k$  – плотность транспортного потока типа  $k$ , ед./км;  $w_k$  – вместимость ТС типа  $k$ , чел/ед.;  $X_{rsk}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$  в сутки, чел;  $f(X_{rsk}, p_k, w_k)$  – некоторая функция от вышеуказанных параметров, характеризующая необходимую протяженность УДС;  $L_r$  – суммарная длина всех полос движения проезжих частей улиц и дорог в области  $r$ .

Функция  $f$  должна быть предпочтительно линейного вида относительно переменных  $X_{rsk}$ .

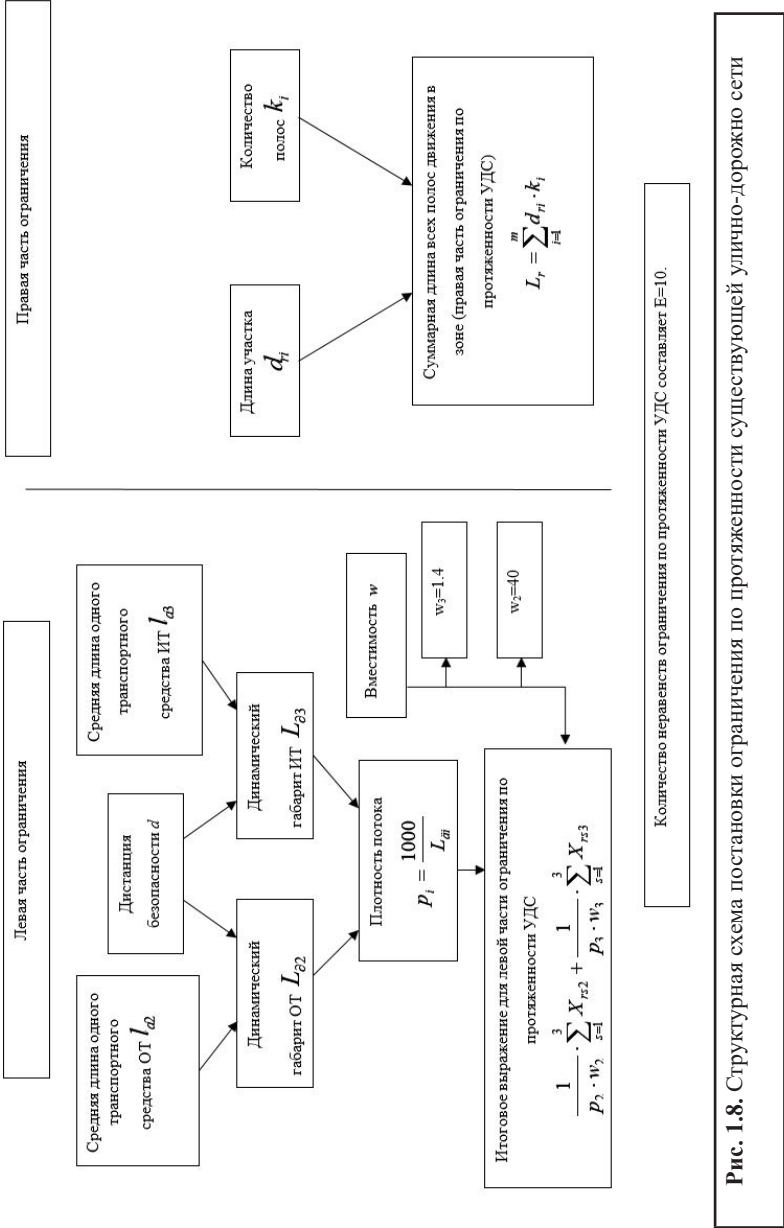
### 1.3.3.3.2. Постановка левой части ограничения

В общем виде левая часть ограничения будет иметь вид:

$$f(X_{rsk}) = \frac{1}{p_2 w_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{p_3 w_3} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \quad (1.28)$$

где  $L_r$  – суммарная длина всех полос движения проезжих частей улиц и дорог в области  $r$ ,  $p_2$  – плотность транспортного потока для ОТ, ед./км;  $p_3$  – плотность транспортного потока для ИТ, ед./км;  $w_2$  – вместимость ТС ОТ, чел/ед.;  $w_3$  – вместимость ТС ИТ, чел/ед.;  $p_2, p_3$  – максимальные плотности транспортных потоков, для общественного и индивидуального транспорта соответственно. Значение  $p_1$  определяется по формуле:

$$p_1 = \frac{1000}{L_{ai}} \quad (1.29)$$



где  $L_{ai}$  – динамический габарит транспортного средства  $i$ -го вида, включает в себя длину транспортного средства  $l_a$  (м) и дистанцию безопасности  $d$  (м).

$$L_{ai} = l_a + d_i \quad (1.30)$$

Дистанция безопасности  $d$  (м) рассчитывается по формуле:

$$d_i = v_i \cdot t + \frac{v_i^2}{2} \left( \frac{1}{j_2} - \frac{1}{j_1} \right), \quad i = 2, 3 \quad (1.31)$$

где  $v_i$  – скорость движения транспортного потока типа  $i$  (м/сек);  $v_2$  – скорость движения ОТ, м/сек;  $v_3$  – скорость движения ИТ, м/сек;  $t$  – время реакции водителя (с);  $j_1, j_2$  – замедление впереди едущего автомобиля и следующего за ним соответственно (м/с<sup>2</sup>).

Таким образом,

$$p_1 = \frac{1000}{l_a + v_i \cdot t + \frac{v_i^2}{2} \left( \frac{1}{j_2} - \frac{1}{j_1} \right)} \quad (1.32)$$

Левая часть ограничения примет вид:

$$\begin{aligned} f(X_{rsk}) = & \frac{1}{1000} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \\ & \frac{1}{l_a + v_2 \cdot t + \frac{v_2^2}{2} \left( \frac{1}{j_2} - \frac{1}{j_1} \right)} w_2 \\ & + \frac{1}{1000} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \\ & \frac{1}{l_a + v_3 \cdot t + \frac{v_3^2}{2} \left( \frac{1}{j_2} - \frac{1}{j_1} \right)} w_3 \end{aligned} \quad (1.33)$$

### 1.3.3.3. Постановка правой части ограничения

Суммарная длина всех полос движение на УДС города (значение  $L_r$ ) определяется по формуле:

$$L_r = \sum_{i=1}^m d_{ri} \cdot k_i \quad (1.34)$$

где

$d_{ri}$  – длина  $i$ -го участка сети в области исследования  $r$ , км;  $k_i$  – количество полос, соответствующее  $i$ -ому участку;  $m$  – количество участков УДС в области.

### 1.3.3.3.4. Постановка ограничения по протяженности существующей УДС для модели российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми

Значения  $L_r$ , рассчитанные для существующего состояния транспортно-

го предложения для каждой зоны, приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4

**Суммарная длина всех полос движения проезжих частей по зонам**

Номер зоны	$L_p$ , км
1	301,098
2	473,328
3	129,390
4	261,613
5	151,266
6	229,257
7	228,690
8	12,705
9	83,828
10	117,013

Далее рассчитаем значения параметров для левой части ограничения: на основании натуральных замеров для индивидуального транспорта значения  $j_1$  и  $j_2$  равны 3 м/с<sup>2</sup> и 2,8 м/с<sup>2</sup>.

Среднюю длину легкового автомобиля примем равной 4,3 м, среднюю длину единицы подвижного состава общественного транспорта – 12 м.

Для общественного транспорта значения  $j_1$  и  $j_2$  равны 2,8 м/с<sup>2</sup> и 1 м/с<sup>2</sup>.

По данным натуральных обследований, скорости движения транспортного потока равны:

- индивидуальный транспорт – 24 км/ч (7,5 м/с),
- общественный транспорт – 18 км/ч (5 м/с).

Время реакции водителя равно 1 сек.

Таким образом, плотность транспортного потока ИТ при скорости 24 км/ч равна:

$$P_3 = \frac{1000_M}{4,3_M + 7,5_M / c \cdot 1c + \frac{(7,5_M / c)^2}{2} \left( \frac{1}{2,8_M / c^2} \cdot \frac{1}{3_M / c^2} \right)} \quad (1.35)$$

Плотность транспортного потока ОТ при скорости 18 км/ч равна:

$$P_2 = \frac{1000_M}{12_M + 5_M / c \cdot 1c + \frac{(5_M / c)^2}{2} \left( \frac{1}{1_M / c^2} \cdot \frac{1}{2,8_M / c^2} \right)} \quad (1.36)$$

По результатам анализа проведенных натуральных обследований загрузки транспортных средств примем следующие значения для  $w_i$ :

$$w_2 = 40 \text{ чел/ед.},$$

$$w_3 = 40 \text{ чел/ед.}$$

Тогда ограничение по территории будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{1000_M} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \\ & \frac{12_M + 5_M / c \cdot 1c + \frac{(5_M / c)^2}{2} \left( \frac{1}{1_M / c^2} \cdot \frac{1}{2,8_M / c^2} \right)}{2} \cdot 40 \\ & + \frac{1}{1000_M} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, \\ & \frac{4,3_M + 7,5_M / c \cdot 1c + \frac{(7,5_M / c)^2}{2} \left( \frac{1}{2,8_M / c^2} \cdot \frac{1}{3_M / c^2} \right)}{2} \cdot 1,4 \end{aligned} \quad (1.37)$$

значения  $L_r$  приведены в таблице 1.4.

### 1.3.3.3.5. Учет наличия выделенных полос для движения общественного транспорта

Последующий анализ решения двойственной модели оптимизационной задачи распределения транспортного спроса показал, что транспортной системе города не хватает основного ресурса – городского пассажирского транспорта общего пользования. Самая большая двойственная оценка (теневая цена) зафиксирована у ограничения по количеству подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования. Тем не менее, пуск дополнительного подвижного состава неоднозначно повлияет на целевую функцию, так в этом случае следует прогнозировать падение скорости смешанного транспортного потока на УДС города. В связи с этим, становится актуальным выделение полос для движения ОТ в составе УДС. Дерево целей увеличения количества подвижного состава ОТ приведено на рисунке 1.9.

Параметры и количество выделенных полос для движения общественного транспорта также можно ввести в модель в виде отдельного ограничения. В связи с этим, в модель вводится еще одно ограничение – ограничение по длине выделенных полос в зоне. Вид ограничения аналогичен ограничению по протяженности УДС:

$$\frac{1}{p'_2 \cdot w_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \leq L'_r \quad (1.38)$$

где  $p'_2$  – плотность потока ОТ на выделенной полосе; она будет соответствовать максимальной плотности потока ОТ;  $L'_2$  – длина выделенных

полос ОТ в зоне.



Рис. 1.9. Дерево целей увеличения количества подвижного состава ОТ

С учетом введенного ограничения в модели предлагается учитывать два показателя скорости движения ОТ: в общем потоке и на выделенной полосе.

Плотность потока ОТ на выделенной полосе  $p'_2$  будем рассчитывать, как:

$$p'_2 = \frac{1000}{L'_{a2}} \quad (1.39)$$

где  $L'_{ai}$  - динамический габарит транспортного средства ОТ на выделенной полосе, включает в себя длину транспортного средства  $l_a$  (м) и дистанцию безопасности  $d'$  (м).

$$L'_{ai} = l_a + d' \quad (1.40)$$

Среднюю длину единицы подвижного состава общественного транспорта примем - 12 м.

Дистанция безопасности  $d'$  (м) рассчитывается по формуле [1]:

$$d' = v'_2 \cdot t + \frac{v'^2_2}{2} \left( \frac{1}{j_2} - \frac{1}{j_1} \right) \quad (1.41)$$

где  $v'_2$  - скорость движения транспортного потока ОТ по выделенной полосе (м/сек);  $t$  - время реакции водителя (сек),  $j_1, j_2$  - замедление едущего впереди автомобиля и следующего за ним (м/сек<sup>2</sup>).

Для общественного транспорта значения  $j_1$  и  $j_2$  равны 2,8 м/с<sup>2</sup> и 1 м/с<sup>2</sup>.

Для движения по выделенной полосе скорость общественного транспорта примем равной скорости потока индивидуального транспорта - 24 км/ч (7,5 м/с).

Время реакции водителя равно 1 сек.

Таким образом, плотность транспортного потока ОТ на выделенной по-

лосе равна:

$$p'_2 = \frac{1000_M}{12_M + 7,5_M / c \cdot 1c + \frac{(7,5_M / c)^2}{2} \left( \frac{1}{1_M / c^2} - \frac{1}{2,8_M / c^2} \right)} = 26,6 \text{ авт. / км} \quad (1.42)$$

Ограничение по использованию выделенных полос примет вид:

$$\frac{1}{26,6 \cdot 40} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \geq L'_r \quad (1.43)$$

где  $X_{rs2}$  – количество людей, совершающих корреспонденции через зону  $r$  по типу  $s$  на ОТ,  $L'_r$  – длина выделенных полос ОТ в зоне.

Есть несколько подходов к постановке ограничения по количеству выделенных полос. Самый правильный подход – делить корреспонденции ОТ по видам транспорта, с тем чтобы разделять в этом показателе трамвайные пути, полосы для движения автомобильного транспорта общего пользования и общую проезжую часть. В этом случае придется отдельно выделять корреспонденции различных систем транспорта и в остальных ограничениях. Однако такое увеличение количества переменных затрудняет проведение анализа результатов решения оптимизационной задачи.

Поэтому предлагается использовать упрощенный подход учета выделенных полос. Он не подразумевает дополнительного деления переменных по видам. Данный подход подразумевает, что выделенные полосы (полосы для движения автомобильного транспорта) должны использоваться на 100%. Данное ограничение будет являться в такой постановке нижним ограничением.

#### 1.3.3.4. Ограничение по имеющемуся подвижному составу

Кроме территории, ограничения по транспортному предложению включают в себя ограничения, связанные с обеспеченностью городской транспортной системы подвижным составом разных марок. Это относится как к обеспеченности города подвижным составом общественного транспорта, так и к наличию индивидуального транспорта у населения. В связи с этим, количество транспортных средств в собственности населения и наличие подвижного состава общественного транспорта также будет являться одним из ограничений при оптимальном распределении транспортного спроса в транспортной системе города. В качестве ограничения будет использоваться существующее состояние парка индивидуального и общественного транспорта.

Структурная схема постановки ограничений по имеющемуся подвижному составу представлена на рисунке 1.10. При постановке данного вида



ограничений используются такие параметры, как средний пассажирооборот и коэффициент выхода подвижного состава на линию. В качестве левой части используется общее количество имеющегося подвижного состава.

Структурная схема постановки ограничения по имеющемуся подвижному составу индивидуального транспорта представлена на рисунке 1.11. При постановке данного ограничения используются такие параметры, как средняя вместимость ТС индивидуального транспорта и среднее количество поездок на индивидуальном транспорте на одного человека в сутки. В качестве левой части используется общее количество ТС индивидуального транспорта, имеющихся в собственности у жителей исследуемой области.

#### 1.3.3.4.1. Постановка ограничения по подвижному составу в общем виде

В общем виде ограничение по имеющемуся подвижному составу будет иметь вид:

$$g(X_{rs2}, u_2, z_2, kl_2) \leq OT; \quad (1.44)$$

$$f(X_{rs3}, w_3, z_3) \leq IT, \quad (1.45)$$

где  $X_{rs2}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ОТ в сутки, чел,  $X_{rs3}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ИТ в сутки, чел. ОТ – количество единиц подвижного состава общественного транспорта, который используется в единой маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования, ед.; ИТ – количество зарегистрированного в городе индивидуального транспорта, ед.;  $u_2$  – средний пассажирооборот единицы транспортного средства общественного транспорта за один оборотный рейс, чел/рейс;  $z_2$  – среднее количество оборотных рейсов на единицу подвижного состава общественного транспорта в сутки, рейс/ед.;  $kl_2$  – коэффициент выхода подвижного состава на линию;  $w_3$  – средняя вместимость транспортного средства ИТ, чел/ед.;  $z_3$  – среднее количество поездок на ИТ одного человека в сутки, рейс.  $f(X_{rs3}, w_3, z_3)$ ,  $g(X_{rs2}, u_2, z_2, kl_2)$  – некоторые функции от вышеуказанных параметров, характеризующие количество подвижного состава.

#### 1.3.3.4.2. Постановка правой части ограничения

В качестве правой части неравенств будут использоваться следующие параметры:

ОТ – количество единиц подвижного состава общественного транспорта, который используется в единой маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования, ед.;

*ИТ* – количество зарегистрированного в городе индивидуального транспорта, ед.

#### 1.3.3.4.3. Постановка левой части ограничения

Левая часть ограничения по имеющемуся подвижному составу будет иметь вид:

$$g(X_{rs2}) = \frac{1}{u_2 \cdot z_2 \cdot kl_2} \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \quad (1.46)$$

$$f(X_{rs3}) = \frac{1}{w_3 \cdot z_3} \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \quad (1.47)$$

где:  $X_{rs2}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ОТ в сутки, чел.;

$X_{rs3}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ИТ в сутки, чел.;

*ОТ* – количество единиц подвижного состава общественного транспорта, который используется в единой маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования, ед.;

*ИТ* – количество зарегистрированного в городе индивидуального транспорта, ед.

Требуется установить вид функций  $g$  и  $f$ . Для этого введем следующие параметры:

$u_2$  – средний пассажирооборот единицы транспортного средства общественного транспорта за один оборотный рейс, чел/рейс. Данная величина определяет параметры суточной неравномерности пассажиропотоков на маршрутах городского пассажирского транспорта общего пользования, а также уровень загрузки подвижного состава (чел/ $m^2$ ) в соответствии со стандартом качества перевозок;

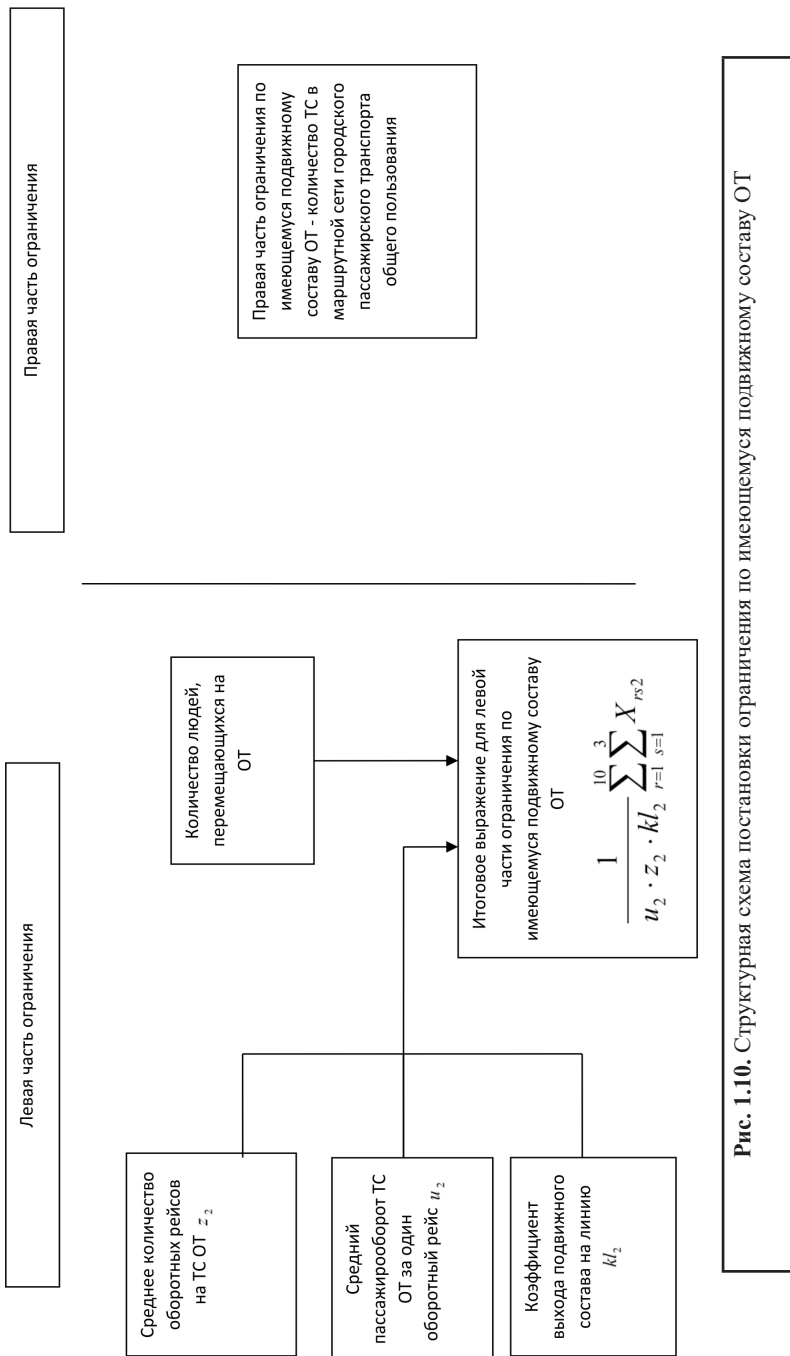
$z_2$  – среднее количество оборотных рейсов на единицу подвижного состава общественного транспорта в сутки, рейс/ед. Данная величина определяет общие параметры сети городского пассажирского транспорта общего пользования, такие как протяженность маршрута и скорость на линии;

$kl_2$  – коэффициент выхода подвижного состава на линию. Данная величина определяет эксплуатационные показатели использования подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования.

Аналогично для индивидуального транспорта примем:

$w_3$  – средняя вместимость транспортного средства ИТ, чел/ед. Данная величина определяет сложившуюся (наблюдаемую) в крупных городах степень использования индивидуального транспорта в ежедневных поездках в будний день;

$z_3$  – среднее количество поездок на ИТ одного человека в сутки, рейс;



**Рис. 1.10.** Структурная схема постановки ограничений по имеющемуся подвижному составу ОТ

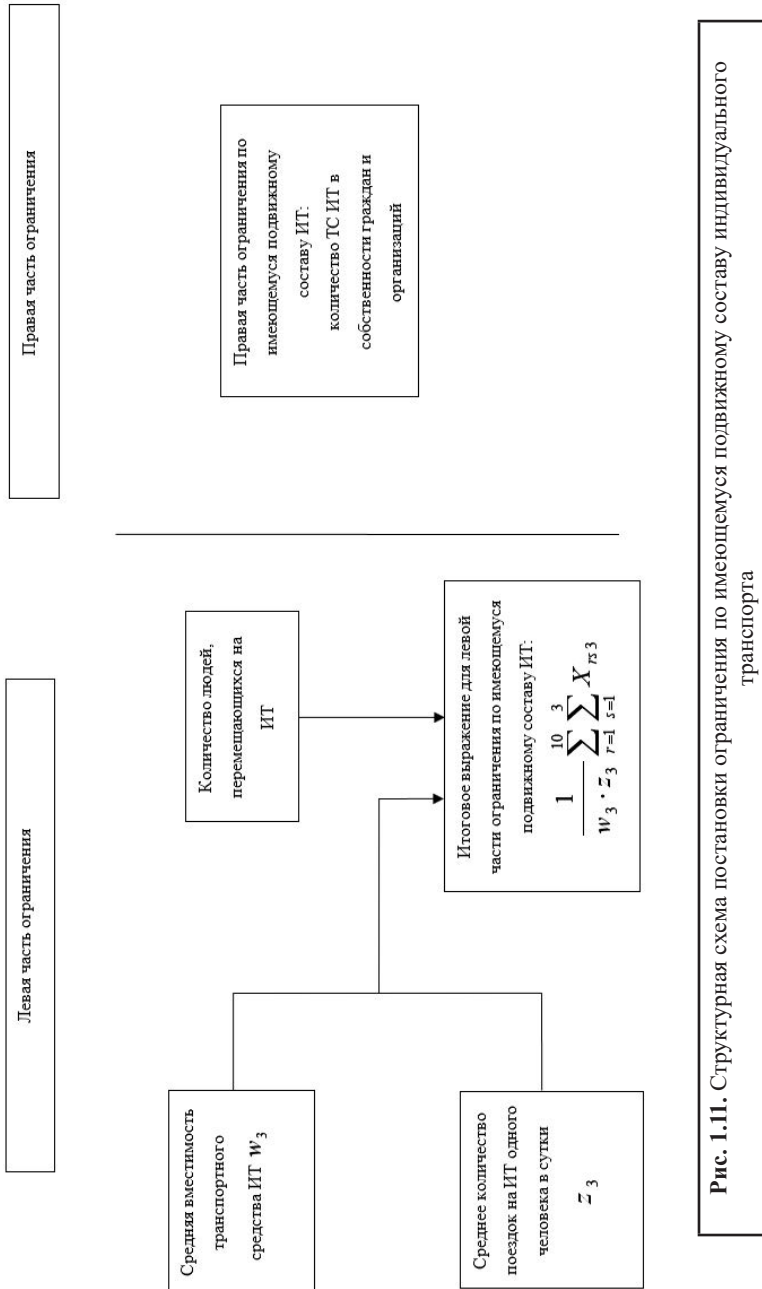


Рис. 1.11. Структурная схема постановки ограничения по имеющемуся подвижному составу индивидуального транспорта

В дальнейшем в модель будет включен также подвижной состав ОТ, который не входит в единую маршрутную сеть городского пассажирского транспорта общего пользования.

#### 1.3.3.4.4. Постановка ограничения по имеющемуся подвижному составу для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми

Для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми приняты следующие значения параметров:

$$OT = 1000 \text{ ед.};$$

$$IT = 285000 \text{ ед.};$$

$$u_2 = 100 \text{ пасс/рейс};$$

$$z_2 = 16 \text{ рейсов};$$

$$kl_2 = 0,8;$$

$$w_3 = 1,4 \text{ чел/ед.};$$

$$z_3 = 6.$$

Тогда для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми ограничение примет вид:

$$\frac{1}{100 \cdot 16 \cdot 0,8} \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \leq 1000, \quad (1.48)$$

$$\frac{1}{1,4 \cdot 6} \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq 285000. \quad (1.49)$$

#### 1.3.3.5. Особенности построения энергетических ограничений

При построении энергетических ограничений используются понятия идеальной и реальной улично-дорожной сети.

Схематичные изображения реальной и идеальной сети приведены на рисунках 1.12-1.13 (см. цветную вклейку).

*Реальная сеть* – это физически существующая УДС, представленная в виде графа, ребрами которой являются дороги и улицы, узлами – перекрестки. Нагрузка участка реальной сети – это интенсивности транспортных потоков на данном участке.

*Идеальная сеть* – это сеть, узлами которой являются центры транспортных районов, а ребрами – воздушные линии, соединяющие их. Нагрузка участка идеальной сети – это количество корреспонденций, совершаемых между парой районов, центры которых являются началом и концом отрезка.

Необходимость использования терминов реальной и идеальной сети в ограничениях связана с тем, что переменные оптимизационной задачи определены в терминах идеальной сети. При этом энергетические ограничения строятся по принципу «не хуже, чем есть», поэтому правые части

данных ограничений логичнее строить исходя из текущего анализа работы реальной УДС города. Далее при расчете каждого из ограничений нужно учитывать не только размеры исследуемой зоны и протяженность УДС данной зоны, но и численность населения зоны, путем учета удельного вредного воздействия. При этом постановка ограничений также формируется из принципа «не хуже, чем сейчас».

Предложенный подход к расчету энергетических ограничений имеет ряд недостатков.

В частности, он не учитывает количество жителей каждой из исследуемых зон, которые попадают под воздействие загрязняющих веществ, шума, риска ДТП. При использовании данного подхода результаты расчета позволяют сделать вывод о том, что допустимый уровень шума или объем выбросов загрязняющих веществ в зоне 1 может быть больше, чем в зоне 9. При этом зона 9 имеет меньшую численность населения и меньшую площадь УДС при большей площади, то есть в действительности при равномерном распределении загрязнения по зоне 9 в пересчете на одного жителя объем вредного воздействия на одного жителя окажется меньше, чем в зоне 1.

Возможен альтернативный подход к расчету энергетических ограничений. Альтернативный подход включает расчет удельного вредного воздействия на одного жителя зоны. Далее при расчете каждого из ограничений нужно учитывать не только размеры исследуемой зоны и протяженность УДС данной зоны, но и население зоны, путем учета удельного вредного воздействия. При этом расчет ограничений так же выполняется по принципу «не хуже, чем сейчас».

#### 1.3.3.6. Экологическое ограничение

Экологическое ограничение относится к энергетическим ограничениям транспортного предложения. Несовершенство технологий преобразования энергии в двигателе внутреннего сгорания наносит вред окружающей среде и здоровью жителей городов.

При постановке экологического ограничения был использован комбинированный подход. Данный подход включает в себя анализ существующих объемов потребления топлива автотранспортом в городах. В целях формирования экологического ограничения на городских территориях был проведен комплекс расчетных экспериментов. Вычислительные эксперименты проводились с целью определения предельного объема движения на городской территории, формирующего предельно допустимое количество сжигаемого топлива транспортом в течение суток.

Возможен также прямой расчет правой части ограничения как существующего положения с загрязнением исследуемой территории, в этом случае ограничение соответствует принципу «не хуже, чем сейчас».

Структурная схема постановки экологического ограничения представлена на рисунке 1.14. При постановке данного вида ограничений используются такие параметры, как удельные значения объема сжигаемого топлива, средняя доля длины корреспонденций в зоне, население зоны.

### 1.3.3.6.1. Постановка экологического ограничения в общем виде

Экологическое ограничение в общем виде будет иметь вид:

$$f(X_{rsk}, l_{rs}, a_k) \leq D \quad (1.50)$$

где  $X_{rsk}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$  в сутки, чел.;  $a_k$  – удельный объем сжигаемого топлива, требуемое на перемещение одного человека на 1 км видом транспорта  $k$ , л/км/чел;  $l_{rs}$  – средняя доля длины корреспонденции через зону  $r$  по типу  $s$ , км.  $f(X_{rsk}, l_{rs}, a_k)$  – есть некоторая функция от вышеуказанных параметров, характеризующая объем сжигаемого топлива;  $D$  – предельный (существующий) объем сжигаемого топлива в течение суток в пересчете на одного жителя города, в сутки, л/чел.

### 1.3.3.6.2. Постановка левой части экологического ограничения

Левая часть экологического ограничения в общем виде будет иметь вид:

$$f(X_{rsk}) = a_1 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs1} + a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \quad (1.51)$$

где  $X_{rs1}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  пешком в сутки, чел.;

$X_{rs2}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ОТ в сутки, чел.;

$X_{rs3}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ИТ в сутки, чел.;

$l_{rs}$  – средняя доля длины корреспонденции через зону  $r$  по типу  $s$ , км;

$a_k$  – удельный объем сжигаемого топлива, требуемое на перемещение одного человека на 1 км видом транспорта  $k$ , л/км/чел.

Для того чтобы получить значение энергии в пересчете на одного человека, левую часть неравенства разделим на количество жителей данной зоны:

$$f(X_{rsk}) = \frac{1}{N_r} (a_1 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs1} + a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3}) \quad (1.52)$$

где  $X_{rs1}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  пешком в сутки, чел.;

$X_{rs2}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ОТ в сутки, чел.;

$X_{rs3}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  на ИТ в сутки, чел.;

$l_{rs}$  – средняя доля длины корреспонденции через зону  $r$  по типу  $s$ , км;

$a_k$  – удельный объем сжигаемого топлива, требуемое на перемещение одного человека на 1 км видом транспорта  $k$ , л/км/чел.

$N_r$  – количество жителей зоны  $r$ , чел.

Таким образом, в общем виде экологическое ограничение будет иметь вид:

$$\frac{1}{N_r} (a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3}) \leq D \quad (1.53)$$

### 1.3.3.6.3. Постановка правой части экологического ограничения

Правая часть ограничения ( $D$ ) определяет существующий объем сжигаемого транспортом топлива на одного жителя города, который рассчитывается по методике [1]. Цель выполнения данного ограничения – не допустить увеличения объема потребления топлива в расчете на одного жителя города по сравнению с существующим объемом.

### 1.3.3.6.4. Постановка экологического ограничения для российского города с населением 1 млн. жителей на примере города Перми

Проведем расчет коэффициентов  $a_2$  и  $a_3$  для российского города с населением 1 млн. жителей на примере города Перми. Значение параметра  $a_1$  равно нулю.

Примем следующие значения параметров:

$$u_2 = 30 \text{ л}/100 \text{ км} \quad (1.54)$$

$$u_3 = 10 \text{ л}/100 \text{ км} \quad (1.55)$$

где

$u_2$  – средний расход топлива ОТ, л/100 км;

$u_3$  – средний расход топлива ИТ, л/100 км;



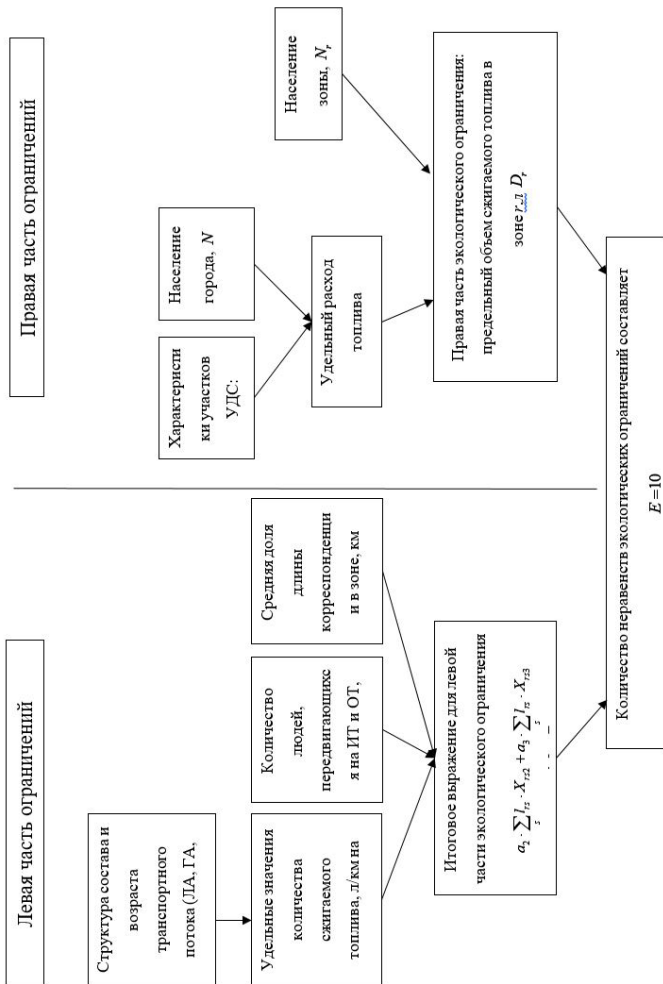


Рис. 1.14. Структурная схема постановки экологических ограничений

С учетом параметров вместимости коэффициенты  $a_2$  и  $a_3$  будут равны:

$$a_k = \frac{u_k}{w_k} / 100 \quad (1.56)$$

где  $a_k$  – удельный объем сжигаемого топлива, требуемое на перемещение одного человека на 1 км видом транспорта  $k$ , л/км/чел.;  $u_k$  – расход топлива ТС вида транспорта  $k$ , л/100 км;  $w_k$  – вместимость ТС вида транспорта  $k$ , чел/ед.

Таким образом, для автобуса удельный объем сжигаемого топлива, требуемое на перемещение одного человека на 1 км, составит:

$$a_2 = \frac{30 \text{ л}/100 \text{ км}}{40 \text{ чел.}} / 100 = 0,0075 \text{ л} / \text{км} / \quad (1.57)$$

Для легкового автомобиля удельный объем сжигаемого топлива, требуемое на перемещение одного человека на 1 км, составит чел.

$$a_3 = \frac{10 \text{ л}/100 \text{ км}}{1,4 \text{ чел.}} / 100 = 0,071 \text{ л} / \text{км} / \text{чел.} \quad (1.58)$$

Значение  $D$  было рассчитано с помощью прогнозной транспортной модели российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми. С использованием прогнозной транспортной модели были рассчитаны суточные интенсивности транспортных потоков на УДС российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми и был рассчитан суммарный суточный пробег индивидуального и общественного транспорта.

Так, суточный пробег индивидуального транспорта составил 10 421 270,5 км. Суммарный пробег автобусов, обслуживающих регулярные маршруты регулярных перевозок, составил 155 873,9 км.

С учетом значений расхода топлива, представленных выше, и численности населения г. Перми 1 042 763 человек, значение  $D$  составит:

$$D = (10421 \text{ 270,5 км} \cdot 10 \text{ л}/100 \text{ км}/100 + 15587369 \text{ км} \cdot 30 \text{ л}/100 \text{ км}/100) / 1042763 \text{ чел.} = 1088889,2 \text{ л}/1042763 \text{ чел.} = 1,044 \text{ л}/\text{чел.}$$

Найденная величина  $D$  является суточным объемом сжигаемого топлива всем движущимся по УДС города Перми транспортом в расчете на одного жителя города.

Таким образом, экологическое ограничение города Перми будет иметь вид:

$$\frac{1}{N_r} (0,0075 \cdot \sum_S \frac{1}{N_r} \cdot \sum_{S=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + 0,071 \cdot \sum_{S=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3}) \leq 1,044 \quad (1.60)$$

Значения  $l_{rs}$  для каждой зоны представлены в таблице 1.3.

### 1.3.3.7. Постановка ограничения по уровню шума

Ограничение по уровню шума относится к энергетическим ограничениям по транспортному предложению. Оценка по уровню шума была разделена на два направления: анализ существующего уровня шума в российском городе с населением 1 млн жителей на примере города Перми и постановка ограничения по уровню шума на одного жителя.

В ходе анализа уровня шума от автотранспортных потоков были разработаны алгоритм для расчета количества населения, находящегося в зоне превышения ПДУ, и алгоритм построения полей уровней транспортного шума на рассматриваемой территории.

При постановке ограничения в качестве правой части оптимальной модели было использовано существующее состояние по уровню транспортного шума на территории в расчете на одного жителя.

Структурная схема постановки ограничений по уровню транспортного шума представлена на рисунке 1.15. При постановке данного вида ограничений используются такие параметры, как площадь территории с определенным уровнем транспортного шума в зоне и вместимость ТС.

#### 1.3.3.7.1. Постановка ограничения по уровню транспортного шума в общем виде

В общем виде ограничение будет иметь вид:

$$f(X_{rsk}, w_k) \leq SR \quad (1.61)$$

где  $X_{rsk}$  – количество людей, передвигающихся через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$  в сутки, чел.;  $w_k$  – средняя вместимость транспортного средства типа  $k$ , чел/ед.  $f(X_{rsk}, w_k)$  – есть некоторая функция от вышеуказанных параметров, характеризующая величину негативного воздействия транспортного шума на население, проживающее на городской территории;  $SR$  – среднее значение уровня транспортного шума, приходящегося на одного жителя города в сутки, Вт/чел.

#### 1.3.3.7.2. Постановка правой части ограничения по уровню транспортного шума

В качестве правой части ограничения будет использоваться фактическое значение уровней шума транспортных потоков, рассчитанных для реальной сети, приходящихся на одного жителя города. При этом решение оптимизационной задачи будет сводиться к тому, чтобы уменьшать общее

время совершения корреспонденций, не увеличивая при этом значение уровня шума, приходящееся на каждого жителя города.

Расчет уровня шума производится для каждого участка УДС на основе интенсивности транспортных потоков в периоды:

- дневной (с 7 до 19 часов);
- вечерний (с 19 до 23 часов);
- ночной (с 23 до 7 часов).

Для каждого участка реальной УДС посчитан уровень шума  $l'_i$  по методике RLS (описание методики приведено для каждого периода).

$l_{Di}$  – уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети в дневной период, дБА;

$l_{Ei}$  – уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети в вечерний период дБА;

$l_{Ni}$  – уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети в ночной период, дБА.

Далее для каждого отрезка сети был рассчитан средний уровень шума за период день-вечер-ночь:

$$L_{deni} = 10 \lg \frac{1}{24} (12 \cdot 10^{\frac{l_{Di}}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{l_{Ei}+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{l_{Ni}+10}{10}}) \quad (1.62)$$

где

$L_{deni}$  – средний уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети за период день-вечер-ночь в час, дБ;

$L_{Di}$  – уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети в дневной период (за 12 часов), дБА;

$L_{Ei}$  – уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети в вечерний период (за 4 часа), дБА;

$L_{Ni}$  – уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети в ночной период (за 8 часов), дБА.

Для всей территории города были построены поля уровней транспортного шума. Для этого территория города была разбита сеткой с шагом 10м. Для каждого узла сетки был рассчитан уровень шума в зависимости от уровня шума ближайших 4 участков УДС и расстояния до данных участков. Таким образом, для каждого узла сетки уровень шума рассчитывался как:

$$L_{xy} = \max(L_{xy1}, \dots, L_{xy4}) + \Delta(\max(L_{xy1}, \dots, L_{xy4}) - \min(L_{xy1}, \dots, L_{xy4})) \quad (1.63)$$

где

$L_{xy}$  – уровень шума в точке с координатами  $(x, y)$ , дБА;

$\Delta$  – функция, зависящая от разности уровней шума источников с самым большим и самым маленьким уровнем шума, дБА. Значения  $\Delta$  в зависимости от значения разности приведены в таблице 1.5.

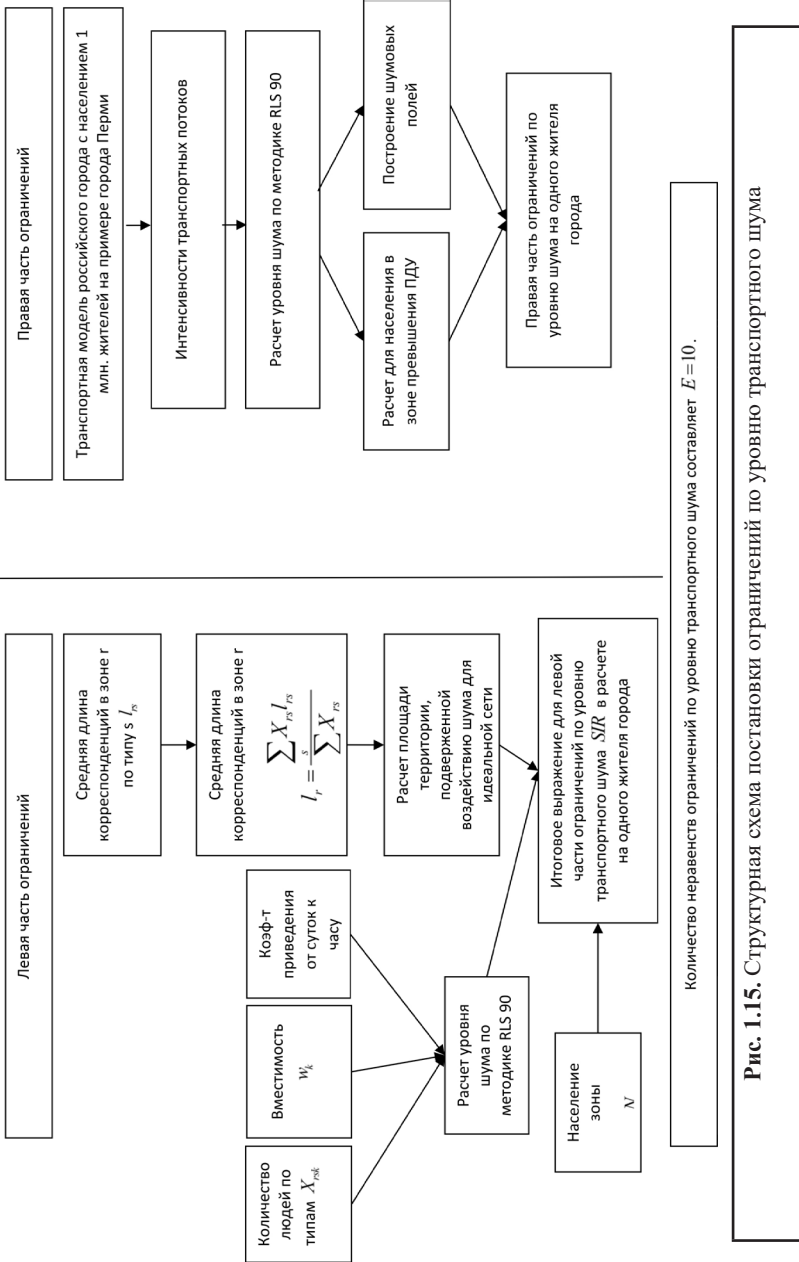


Таблица 1.5

**Значения  $\Delta$  в зависимости от значения разности**

Разность уровней шума, дБА	0	1	2,5	4	6	10
Значение $\Delta$ , дБА	3	2,5	2	1,5	1	0,5

$L_{xyi}$  – уровень шума в точке с координатами  $(x, y)$  от  $i$ -го из четырех ближайших к данной точке участков УДС, дБА.

$$L_{xyi} = L_{deni} - 10 \cdot \log_{10} \frac{R_i}{7,5} \quad (1.64)$$

где

$L_{deni}$  – средний уровень шума транспортного потока  $i$ -го отрезка реальной сети за период день-вечер-ночь, дБА;

$R_i$  – расстояние от отрезка  $i$  до точки  $(x, y)$ , м.

В итоге была получена шумовая карта для всей территории города (рис. 1.16, см. цветную вклейку).

Далее для каждого здания на территории города рассчитаем, какая доля жителей данного здания находится в зоне превышения ПДУ шума:

1. Для всех отрезков реальной сети необходимо определить расстояние, на котором шумовая нагрузка не будет превышать ПДУ. В соответствии с «Методическими рекомендациями по оценке необходимого снижения звука у населенных пунктов и определению требуемой акустической эффективности экранов с учетом звукопоглощения» снижение уровня шума источника ( $L_{A_{рас}}$ ) с расстоянием равно:

$$L_{A_{рас}} = 10 \cdot \log_{10} \frac{R_i}{R_0}, \quad (1.65)$$

где

$R$  – расстояние от акустического центра автотранспортного потока до расчетной точки, м;

$R_0 = 7,5$  м – для автотранспортных потоков.

Из данного соотношения можно выразить  $R$ :

$$R = R_0 \cdot 10^{\frac{L_{A_{рас}}}{10}}, \quad (1.66)$$

где за  $L_{A_{рас}}$  примем разность между рассчитанным уровнем шума и ПДУ (45 дБА).

2. Далее для каждого отрезка строим через каждые 10 м лучи длиной  $R$  перпендикулярно отрезку:

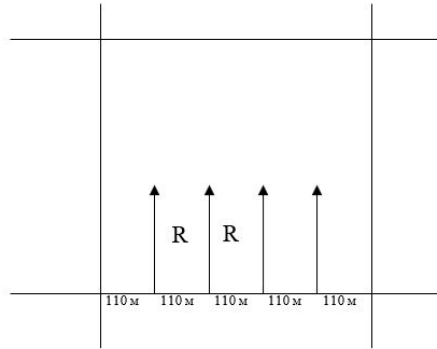


Рис. 1.17. Построение лучей перпендикулярно отрезку

Координаты начала и конца лучей определяются из следующих соотношений:

$$xl_{1i} = x_1 + 10 \cdot \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \cdot i \quad (1.67)$$

$$yl_{1i} = y_1 + 10 \cdot \frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \cdot i \quad (1.68)$$

$$xl_{2i} = xl_{1i} + R \cdot \frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (1.69)$$

$$yl_{2i} = yl_{1i} + R \cdot \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (1.70)$$

$$i = 1, \dots, N \quad (1.71)$$

$$N = (L \operatorname{div} 10) \quad (1.72)$$

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1.73)$$

где

$\operatorname{div}$  – операция целочисленного деления;  $(xl_{1i}, yl_{1i})$  – координаты начала  $i$ -го луча;  $(xl_{2i}, yl_{2i})$  – координаты конца  $i$ -го луча;  $(x_1, y_1)$  – координаты начала отрезка;  $(x_2, y_2)$  – координаты конца отрезка;  $L$  – длина отрезка;  $R$  – длина луча.

3. Для каждой точки отрезка, из которой выходит луч, ищем все здания, расстояние до центров которых не превышает  $R$ . Расстояние считаем по формуле:

$$l_i = \sqrt{(X - x_1)^2 + (Y - y_1)^2} \quad (1.74)$$

где  $X, Y$  – координаты начала луча;  $x_1, y_1$  – координаты центра здания  $i$ .

5. Для найденных зданий проводим следующую операцию.

Перебираем каждый луч из рассматриваемого отрезка и проверяем каждую сторону данных зданий, пересекается ли сторона с рассматриваемым лучом. Для этого проверяем пересечение прямых, образующих сторону здания и луч. Если они пересекаются, необходимо определить, лежит ли точка пересечения внутри отрезка и внутри луча одновременно.

Для этого записываем оба уравнения прямых в виде

$$1. A_1x + B_1y + C_1 = 0$$

$$2. A_2x + B_2y + C_2 = 0$$

1 – уравнение прямой луча длиной  $R$ ;

2 – уравнение прямой стороны здания.

Тогда координаты точки пересечения прямых:

$$x = -\frac{C_1B_2 - C_2B_1}{A_1B_2 - A_2B_1} \quad (1.75)$$

$$y = -\frac{A_1C_2 - A_2C_1}{A_1B_2 - A_2B_1} \quad (1.76)$$

Нахождение точки внутри луча и стороны здания проверяем следующим образом.

Считаем площади треугольников, образованных началом координат, точкой пересечения и одним из концов луча (стороны здания). Затем проверяем, равна ли сумма этих площадей площади треугольника, образованного началом координат и концами луча (стороны здания). Если да, то вычисляем расстояние от начала луча до стороны здания:

$$l = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad (1.77)$$

где

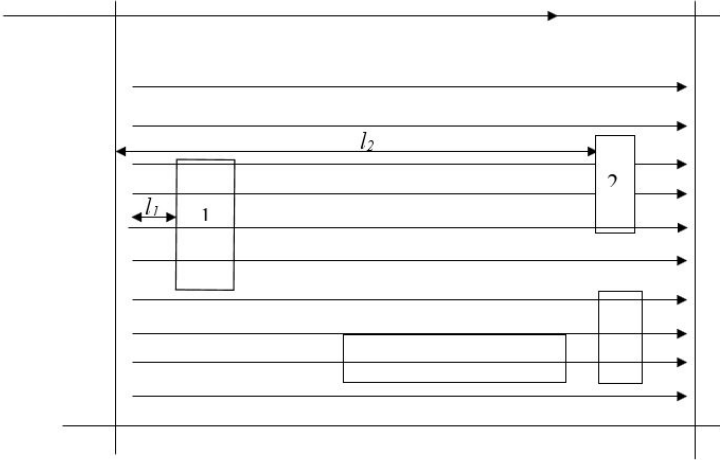
$x, y$  – координаты точки пересечения луча и стороны здания;  $x_1, y_1$  – координаты начала луча.

6. Из всех сторон полигонов зданий выбираем ту, до которой расстояние от начала рассматриваемого луча наименьшее, и в свойствах данного здания увеличиваем значение параметра количества сторон, в которые приходят лучи ( $k_i$ , где  $i$  – идентификатор полигона здания), на единицу, также в свойствах стороны полигона.

$$l_1 < l_2 \Rightarrow k_2 := k_2 + 1 \quad (1.78)$$

7. Переходим к следующему лучу, а затем к следующему отрезку. При этом исключаем из рассмотрения стороны полигонов зданий, которые пересек какой-либо из лучей.





**Рис. 1.18.** Выбор стороны здания и определение значения параметра количества сторон

8. Получаем для каждого полигона здания количество сторон, для которых превышен ПДУ, а также для каждой стороны – пересекает ее какой-либо луч или нет.

9. Считаем население в каждом здании, живущее в зоне превышения ПДУ по формуле:

$$N' = N \cdot \frac{\sum_{i=1}^k l_i}{P} \quad (1.79)$$

где

$N'$  – население здания, живущее в зоне превышения ПДУ;  $l_i$  – длина  $i$ -й стороны полигона здания, которую пересекает один из лучей;  $P$  – периметр полигона здания.

10. Суммируем  $N'$  по зонам.

В результате для каждого здания в городе определена доля населения, попадающего в зону превышения ПДУ шума (рис. 1.19-1.20, см. цветную вклейку).

Таким образом, для каждой точки территории города известен уровень шума  $L_{xy}$ , дБА, для каждого здания известно количество жителей, живущих в зоне превышения ПДУ шума. Требуется определить уровень шумового воздействия в расчете на одного жителя города.

Для определения уровня шума на территории здания, в зависимости от полученных значений в узлах регулярной сетки рассчитаем средний по площади здания уровень шума для каждого здания. Для этого найдем среднее значение уровня шума на территории каждого здания:

$$L_i = \frac{\sum_{j=1}^M L_{xyij}}{M} \quad (1.80)$$

где

$L_i$  – уровень шума для  $i$ -го здания, дБА;  $L_{xyij}$  – уровень шума в  $j$ -й точке с координатами  $(x, y)$ , находящейся внутри здания  $i$ , дБА;  $M$  – количество узлов сетки с шагом 10 м внутри здания  $i$ .

Полученный уровень шума  $L_i$  для каждого здания из дБА переведем в Вт/м<sup>2</sup>. При расчете уровня шума в дБА в качестве эталонного уровня шума принято значение 10<sup>-12</sup> Вт/м<sup>2</sup>. Это означает, что рассчитанный уровень шума в 1 дБА соответствует 10<sup>-12</sup> Вт/м<sup>2</sup>. В связи с этим, перевод из дБА в Вт/м<sup>2</sup> был произведен по формуле

$$L_i^{Bm} = 10^{-12 + \frac{L_i}{10}} \quad (1.81)$$

где

$L_i^{Bm}$  – уровень шума для здания  $i$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $L_i$  – уровень шума для здания  $i$ , дБА. Для расчета абсолютного значения удельного уровня шума для каждого здания необходимо рассчитать площадь территории, для которой будет производиться оценка уровня шума. Принимается значение площади территории, занимаемое рассматриваемым зданием.

Таким образом, уровень воздействия транспортного шума в расчете на одного жителя города будет определяться следующим образом:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^K L_i^{Bm} \cdot S_i / N_i}{K} \quad (1.82)$$

где

$L$  – удельный уровень шума в расчете на одного жителя, Вт;  $S_i$  – площадь основания  $i$ -го здания, м<sup>2</sup>;  $N_i$  – количество жителей здания, живущих в зоне превышения ПДУ шума, чел.;  $K$  – количество жилых зданий в городе.

### 1.3.3.7.3. Расчет левой части ограничения по уровню шума

Расчет коэффициентов для постановки левой части ограничений по уровню шума будем осуществлять по той же методике, по которой происходит расчет уровней шума в прогнозной транспортной модели. Отличие от расчета правой части ограничения будет в том, что левая часть ограничения строится в терминах идеальной сети.

В методике RLS 90 уровень шума рассчитывается как:

$$L = 37,5 + 10 \cdot \log_{10}(q) \quad (1.83)$$

где

$L$  – уровень шума на участке УДС на расстоянии 7,5 м от края проезжей

части, дБА;  $q$  – часовая интенсивность транспортного потока, авт/ч.

При расчете левой части ограничения примем некоторые допущения:

1. Вместо интенсивности транспортного потока будем использовать частное количества людей и вместимости введенных в модель единиц подвижного состава каждого вида транспорта.

2. Площадь полуцилиндров, характеризующих зону воздействия транспортного шума, будем строить для отрезков идеальной сети.

Тогда, с учетом допущения 1, выражение для уровня шума в дБА примет вид:

$$SI_r = 37,5 + 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \quad (1.84)$$

где

$SI_r$  – общий уровень шума в зоне  $r$ , рассчитанный для идеальной сети, дБА на расстоянии 7,5 м;  $X_{rsk}$  – количество людей, передвигающихся в зоне  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$ , чел/сутки;  $r = 1..10$  – номера зон;  $s = 1..3$  – типы прохождения зон (транзит, въезд, внутреннее движение);  $k = 1..3$  – вид транспорта (пешком, ОТ, ИТ);  $w_2$  – вместимость ТС типа 2 (ОТ);  $w_3$  – вместимость ТС типа 3 (ИТ).

Так как для расчета по методике требуется часовая интенсивность транспортного потока, будем использовать коэффициент приведения от суток  $dh$ :

$$SI_r = 37,5 + 10 \cdot \log_{10} \left( dh \cdot \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \right). \quad (1.85)$$

Полученная величина будет выражаться в дБА. Переведем ее в Вт/м<sup>2</sup>:

$$SI_r = 10^{-12 + \frac{37,5 + \log_{10} \left( dh \cdot \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \right)}{10}}, \quad (1.86)$$

где

$SI_r$  – уровень шума в зоне  $r$ , рассчитанный для идеальной сети, Вт/м<sup>2</sup>.

Далее, с учетом допущения 2, для получения энергии воздействия шума, нужно умножить получившееся выражение на площадь боковой поверхности эллиптического цилиндра  $s_r$ , построенного следующим образом:

– в качестве образующей прямого цилиндра выбирается средняя длина корреспонденций в зоне  $l_r$ , то есть средняя длина отрезка идеальной сети. При этом используется допущение о том, что все корреспонденции в зоне совершаются по одному среднему отрезку идеальной сети.

– в качестве направляющей кривой цилиндра выбирается эллипс с малой полуосью, равной 7,5 м, и большой полуосью, равной средней ширине про-

езжей части дороги + 7,5 м. Средняя ширина проезжей части в российском городе с населением 1 млн жителей на примере города Перми составляет 1,12 полосы или 3,92 м.

Высота цилиндра равняется средней длине корреспонденции в каждой зоне:

$$l_r = \frac{\sum_s X_{rs} l_{rs}}{\sum_s X_{rs}} \quad (1.87)$$

где

$l_r$  – длина отрезка идеальной сети, равная средней длине корреспонденции в зоне  $r$ ;  $l_{rs}$  – средняя длина корреспонденции типа прохождения  $s$  в зоне  $r$ ;  $X_{rs}$  – фактическое количество людей, передвигающихся в зоне  $r$  по типу  $s$ .

Вид полуцилиндра приведен на рисунке 1.21.

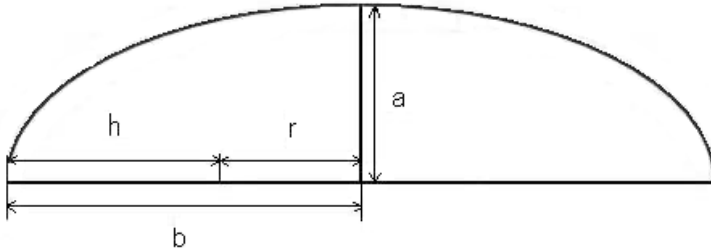


Рис. 1.21. Сечение полуцилиндра

Где:

$a$  – малая полуось эллипса, м,  $a = h = 7,5$  м;  $b$  – большая полуось эллипса, м,  $b = h + r = 7,5 + n \cdot 3,5$  м;  $r$  – ширина проезжей части, м;  $n$  – количество полос движения в одном направлении.

Площадь полуцилиндра будет равна:

$$S_r = \frac{1}{2} \pi \cdot (a + b) \cdot l_r \quad (1.88)$$

где

$S_r$  – площадь полуцилиндров в зоне  $r$ ;  $a$  – малая полуось цилиндра;  $b$  – большая полуось цилиндра;  $l_r$  – длина отрезка идеальной сети, равная средней длине корреспонденции в зоне  $r$

$$l_r = \frac{\sum_s X_{rs} l_{rs}}{\sum_s X_{rs}} \quad (1.89)$$

где

$l_{rs}$  – средняя длина корреспонденции типа прохождения  $s$  в зоне  $r$ ;  $X_{rs}$  – фактическое количество людей, передвигающихся в зоне  $r$  по типу  $s$ .

Далее мы должны получить значение энергии шумового воздействия,

приходящейся на одного жителя зоны. Для этого разделим левую часть на количество жителей зоны  $N_r$ .

Таким образом, получим следующие ограничения по шуму:

$$\frac{S_r}{N_r} \cdot 10^{-12 + \frac{37,5 + 10 \log_{10} \left( dh \cdot \frac{\left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right)}{10} \right)}{10}} \leq SR \quad (1.90)$$

Приведем неравенство к линейному виду:

$$\log_{10} 10^{-12 + \frac{37,5 + 10 \log_{10} \left( dh \cdot \frac{\left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right)}{10} \right)}{10}} \leq \log_{10} \frac{SR \cdot N_r}{S_r} \quad (1.91)$$

$$-12 + \frac{37,5 + 10 \log_{10} \left( dh \cdot \frac{\left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right)}{10} \right)}{10} \leq \log_{10} \frac{SR \cdot N_r}{S_r} \quad (1.92)$$

$$\log_{10} \left( dh \cdot \frac{\left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right)}{10} \right) \leq \log_{10} \frac{SR \cdot N_r}{S_r} + 8,25 \quad (1.93)$$

$$\log_{10} \left( dh \cdot \frac{\left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right)}{10} \right) \leq \log_{10} \frac{SR \cdot N_r}{S_r} + \log_{10} 10^{8,25} \quad (1.94)$$

$$\log_{10} \left( dh \cdot \frac{\left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right)}{10} \right) \log_{10} \left( \frac{SR \cdot N_r}{S_r} \cdot 10^{8,25} \right) \quad (1.95)$$

$$\frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \leq \frac{1}{dh} 10^{8,25} \cdot \frac{SR \cdot N_r}{S_r} \quad (1.96)$$

$$\frac{S_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8,25}} \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \leq SR \quad (1.97)$$

Полученное неравенство является линейным и может использоваться в постановке оптимизационной задачи.

#### 1.3.3.7.4. Постановка ограничения по уровню шума для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми

Для постановки левой части ограничения был проведен расчет площадей полуцилиндров. Значения параметра приведены в Таблице 1.6.

Таблица 1.6

#### Значения параметра $S_p$ по зонам

Номер зоны	Значение параметра $s_p$ , м <sup>2</sup>
1	127 560,60
2	188 563,53
3	135 689,70
4	183 038,51
5	242 803,77
6	268 745,61
7	332 808,10
8	145 066,39
9	180 444,33
10	236 130,1

Расчет правой части ограничения проводился с помощью данных прогнозной транспортной модели российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми. С помощью модели были получены характеристики участков УДС, а также интенсивности транспортных потоков.

В результате расчета для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми получилось следующее значение энергии воздействия шума, приходящейся на одного жителя:

$$SR=0.00006556 \text{ Вт/м}^2$$

Стоит отметить, что полученное значение энергии воздействия шума, приходящейся на одного жителя, является средним за час. Для получения значения энергии воздействия шума за сутки полученное значение необходимо умножить на 24. Таким образом, для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми суточное значение энергии воздействия шума на одного жителя составляет:

$$SR=0.001573346 \text{ Вт/м}^2$$

Величина  $SR$  представляет собой величину энергии воздействия шума на население, образуемой транспортными потоками, в расчете на одного жителя российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми.

Таким образом, для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми ограничение по воздействию транспортного шума примет вид:

$$\frac{s_r \cdot 0,1}{N_r \cdot 10^{8,25}} \left( \frac{\sum_s X_{rs2}}{40} + \frac{\sum_s X_{rs3}}{1,4} \right) \leq 0,001573346 \quad (1.98)$$

### 1.3.3.7.5. Сравнение алгоритмов расчета правой и левой частей при формировании ограничения по уровню транспортного шума

Главное отличие расчета правой и левой частей ограничения – разное суммирование показателей уровня шума. Это связано с тем, что левая часть ограничения определена в терминах идеальной сети, а правая часть – в терминах реальной сети. Изобразим схематически алгоритмы расчета правой и левой частей ограничения:

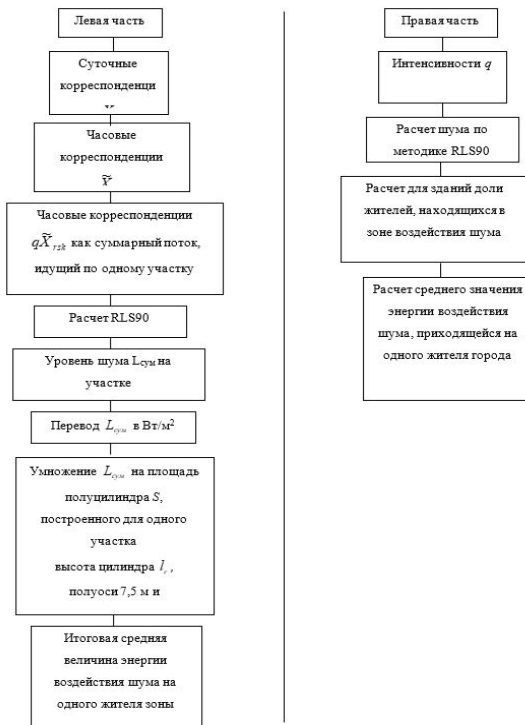


Рис. 1.22. Алгоритм расчета правой и левой частей ограничения

Таким образом, в левой части сначала суммируется весь поток в зоне, а затем уровень шума в зоне. При этом используется допущение, что все корреспонденции через зону  $\tilde{X}_{rsk}$  совершаются по одному участку идеальной сети с длиной, равной средней длине корреспонденции в зоне  $l_r$  (рис. 1.23). Ширина данного участка равняется средней ширине участка на УДС города.

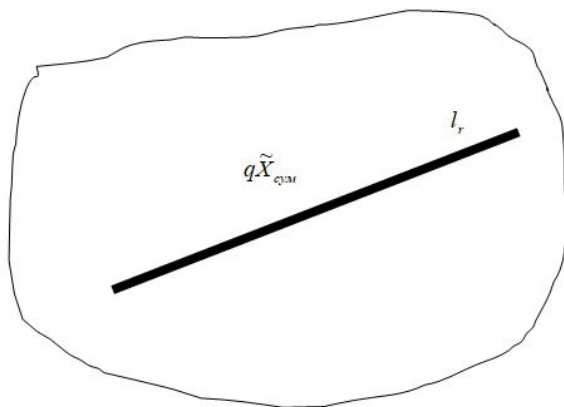


Рис. 1.23. Сеть для расчета уровня шума для идеальной сети

Именно для этого участка затем строится полуцилиндр, определяющий площадь территории, подвергающейся шумовому воздействию. Так как принята гипотеза, что все корреспонденции  $\tilde{X}_{rsk}$  совершаются по одному участку, то воздействие транспортного шума на население происходит вдоль этого участка. Площадь территории, попадающей в зону воздействия шума, определяется через полуцилиндр, построенный для данного участка. Высота полуцилиндра равна  $l_r$ , оси полуцилиндра равны 7,5 метров и 7,5 метров + средняя ширина участка УДС города.

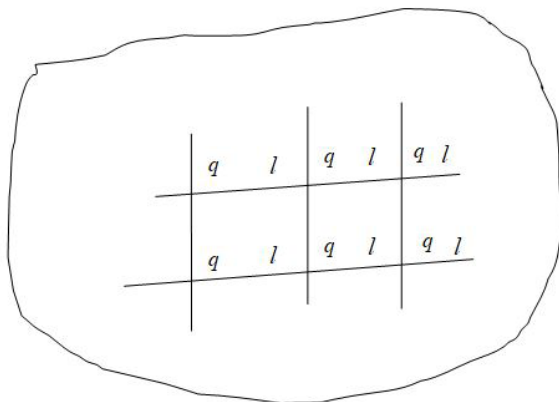
В правой же части, соответствующей реальной сети, сначала считается энергия воздействия шума для каждого участка УДС города (рис. 1.24).

Затем определяется доля населения в зоне воздействия транспортного шума и рассчитывается существующее среднее значение энергии воздействия шума, приходящейся на одного жителя города в сутки.

#### 1.3.3.8. Ограничения по рискам возникновения ДТП

Ограничение по рискам возникновения ДТП, как и экологическое ограничение и ограничение по уровню шума, относится к энергетическим ограничениям по транспортному предложению.





**Рис. 1.24.** Сеть для расчета уровня шума для реальной сети

Оценка риска возникновения ДТП важна, так как при ДТП кинетическая энергия движущегося транспортного средства утилизируется в прямой вред жизни и здоровью человека, снижая качество жизни людей, сказываясь на самых первых и главных – физиологических и экзистенциальных потребностях людей. Кроме того, в случае сохранения безопасности для самих участников дорожного движения при возникновении мелких ДТП энергия транспортного потока также тратится неэффективно: в результате ДТП возникают заторы, которые влияют на функционирование всей транспортной системы города.

Введем следующие определения:

*Риск возникновения ДТП* – это качественная характеристика опасности попадания участников дорожного движения в ДТП. Понятие риск введем как прямую зависимость частотности возникновения ДТП и ущерба от ДТП. Их произведение будет являться риском возникновения ДТП.

*Частотность возникновения ДТП* – это вероятностная характеристика риска возникновения ДТП. В расчете на одного человека, частотность возникновения ДТП характеризует вероятность попадания одного человека в ДТП, произошедшие в рассматриваемой области за рассматриваемый период.

*Ущерб от ДТП* – это денежный эквивалент риска возникновения ДТП. Совокупный ущерб от ДТП определяется как средний ущерб от одного ДТП, умноженный на количество ДТП. В расчете на одного человека ущерб от ДТП определяет в денежном эквиваленте приходящийся на одного жителя города ущерб от всех произошедших за рассматриваемый период ДТП с учетом материального ущерба, а также количества погибших и раненых

в ДТП.

Таким образом, риск ДТП будем оценивать по частотности возникновения ДТП и ущербу от ДТП. При этом частотность будет характеризовать вероятность реализации риска ДТП, а ущерб будет характеризовать последствия реализации риска ДТП.

При постановке ограничений по рискам возникновения ДТП оцениваются частотность возникновения ДТП и ущерб от ДТП для каждого из типов перемещения – пешком, на индивидуальном и общественном транспорте. При этом и частотность возникновения ДТП, и ущерб от ДТП будут определяться в расчете на одного жителя города.

Правая часть ограничения по риску возникновения ДТП будет строиться из принципа «не хуже, чем сейчас». Будет рассчитана оценка существующих значений частотности возникновения ДТП и ущерба от ДТП для одного жителя города с учетом имеющегося на сегодня разделения реализации транспортного спроса по типам транспорта.

Структурная схема постановки ограничений по риску возникновения ДТП представлена на рис. 1.25. При постановке данного вида ограничений используются такие параметры, как средняя вместимость и скорость ТС.

#### 1.3.3.8.1. Постановка ограничения по риску возникновения ДТП в общем виде

В общем виде ограничения по частотности возникновения ДТП и ущербу от ДТП будет иметь вид

$$\begin{aligned} e(X_{rsk}, v_k, w_k) &\leq P, \\ g(X_{rsk}, v_k, w_k) &\leq U, \end{aligned} \tag{1.99}$$

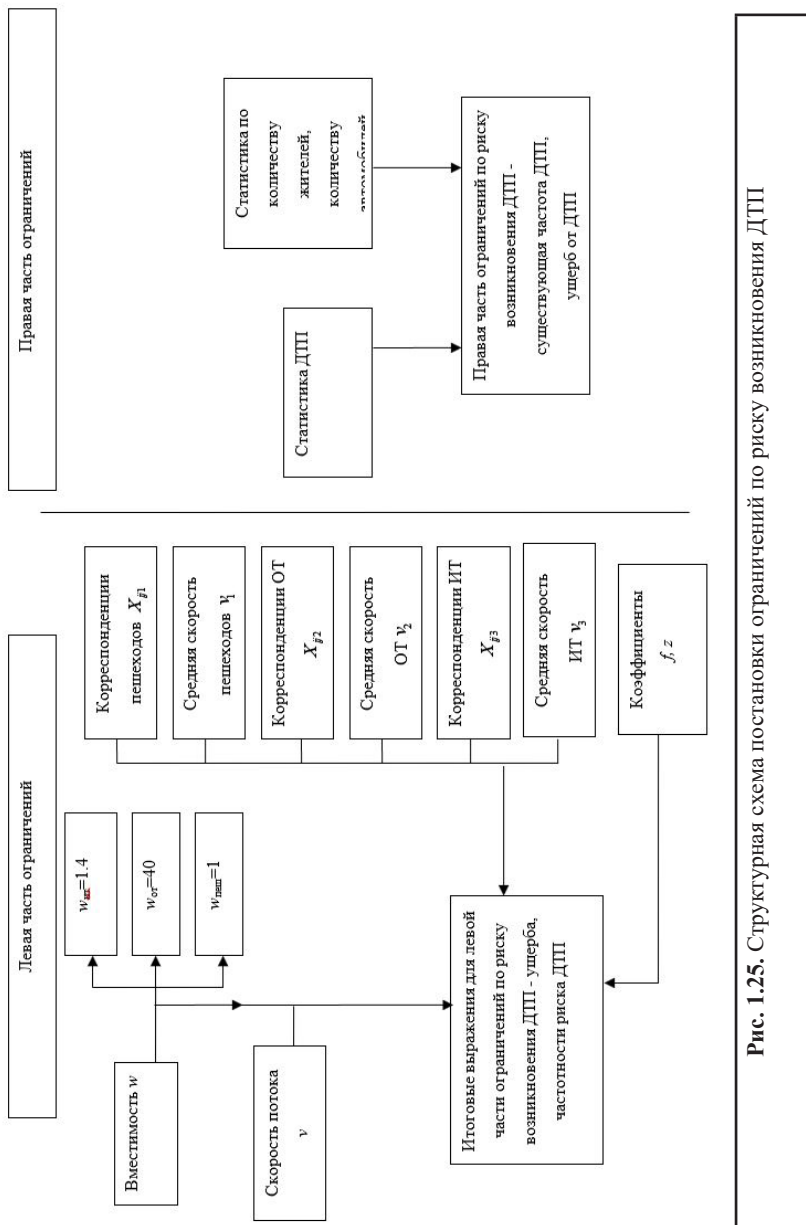
где

$X_{rsk}$  – количество корреспонденций, совершаемых через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$  в сутки, чел.;  $v_k$  – скорость движения транспортного средства типа  $k$ , км/ч;  $w_k$  – средняя вместимость транспортного средства типа  $k$ , чел/ед.;  $P$  – частотность возникновения ДТП в расчете на одного жителя города, ДТП/чел/год;  $U$  – ущерб от ДТП в расчете на одного жителя города, руб./чел./год;  $e(X_{rsk}, v_k, w_k)$ ,  $g(X_{rsk}, v_k, w_k)$  – некоторые функции от вышеуказанных параметров, характеризующие частотности возникновения и ущерб от ДТП.

#### 1.3.3.8.2. Постановка левой части ограничения

Левая часть ограничения имеет вид

$$e(X_{rsk}, v_k, w_k),$$



**Рис. 1.25.** Структурная схема постановки ограничений по риску возникновения ДТП

$$g(X_{rsk}, v_k, w_k).$$

При определении конкретного вида ограничений примем гипотезу, что ограничение имеет линейный вид. Тогда необходимо ввести коэффициенты  $z$  и  $f_k$ , которые будут характеризовать частотность возникновения (коэффициент  $z$ ) и ущерб от ДТП (коэффициенты  $f_k$ ) в пересчете на единицу потока, так как общепринятой методики определения этих коэффициентов не существует. По своему смыслу эти коэффициенты будут являться аналогами коэффициентов  $a_k$  для экологического ограничения (количество энергии, затрачиваемой одной единицей ТП типа  $k$  на выброс 1 кг  $NO_x$ ).

Ограничение по риску ДТП определяет частотность возникновения ДТП и величину ущерба от ДТП в расчете на одного жителя города, поэтому необходимо добавить в ограничение зависимость от количества жителей, а также от количества пользователей ИТ и ОТ зоны.

Тогда ограничение будет иметь вид

$$z \cdot \left( \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \right) \leq P; \quad (1.100)$$

$$f_1 \cdot \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + f_2 \cdot \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + f_3 \cdot \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \leq U; \quad (1.101)$$

где

$P$  – частотность возникновения ДТП в расчете на одного жителя города, ДТП/чел./год;  $U$  – ущерб от ДТП в расчете на одного жителя города, руб./чел./год;  $X_{rsk}$  – количество корреспонденций, совершаемых через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$ , чел.;  $v_k$  – скорость движения транспортного средства типа  $k$ , км/ч;  $w_k$  – средняя вместимость транспортного средства типа  $k$ , чел/ед.;  $N_{1r}$  – количество жителей в зоне  $r$ , чел.;  $N_{2r}$  – количество пользователей ОТ в зоне  $r$ , чел.;  $N_{3r}$  – количество пользователей ИТ в зоне  $r$ , чел.;  $z$  – нормирующий коэффициент, характеризующий частотность возникновения ДТП в расчете на одно транспортное средство, км/час/ед.;  $f_k$  – нормирующий коэффициент, характеризующий ущерб от ДТП для корреспонденций, совершаемых на транспортном средстве типа  $k$  в расчете на одно транспортное средство, руб км/ч/ед.;  $s$  – тип прохождения через зону: транзит, въезд, внутреннее движение,  $s = 1, 2, 3$ .

Значения параметров  $z$  и  $f_k$  определяются на основании существующей статистики ДТП. Методика их расчета описана ниже.

### 1.3.3.8.3. Постановка правой части ограничения

Правые части ограничения характеризуют удельное отношение частотности и ущерба от ДТП на одного человека: для ОТ величина риска и ущерба в расчете на одного пассажира ОТ, для ИТ – в расчете на одного пользователя ИТ, для пешеходов – на одного жителя города.

Правая часть неравенства будет рассчитана по существующей ситуации на основе данных о местах концентрации ДТП, их количества и тяжести.

Для каждой точки концентрации ДТП привязана следующая информация:

- общее количество ДТП;
- количество погибших в ДТП;
- количество раненых в ДТП.

На основе статистических данных будет рассчитан существующий ущерб от ДТП для каждой группы корреспонденций и найдены зависимости ущерба от существующего количества корреспонденций каждой группы.

В правой части неравенства в качестве ограничения будет использоваться существующий уровень риска ТП. Его расчет проведем на основе статистических данных о ДТП, произошедших на территории российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми за 2009 год, предоставленных ГИБДД города.

Представленные данные о имевших место ДТП можно классифицировать по типовому набору различных причин их возникновения. Для этих целей используем принятую в практике региональных подразделений ГИБДД классификацию типовых причин возникновения ДТП:

*Таблица 1.7*

### **Классификация типовых причин возникновения ДТП**

<b>Виды причин ДТП</b>	<b>Пострадавшие в ДТП</b>
Боковой интервал	ИТ, ОТ
«Встречка»	ИТ, ОТ
«Встречка», выход	ИТ, ОТ
«Встречка», скорость	ИТ, ОТ
Выход	ИТ, ОТ
Дистанция	ИТ, ОТ
Дистанция, сигнал	ИТ, ОТ
Интервал, не уступил	ИТ, ОТ
Маневрирование	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества	ИТ, ОТ
Нарушение правил проезда перекрестка	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, «встречка»	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, дистанция	ИТ, ОТ

Виды причин ДТП	Пострадавшие в ДТП
Непредоставление преимущества, задний ход	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, переход	пешеход
Непредоставление преимущества, сигнал	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, скорость	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, наезд	пешеход
Непредоставление преимущества, скорость	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, сигнал	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, «встречка»	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества, скорость	ИТ, ОТ
Непредоставление преимущества	ИТ, ОТ
Несоблюдение скоростного режима	ИТ, ОТ
Обгон	ИТ, ОТ
Переход	пешеход
Переход в неустановленном месте	пешеход
Переход, не предоставление преимущества, скорость	пешеход
Переход, скорость	пешеход
Переход, скорость, «встречка»	пешеход
Расположение на проезжей части	ИТ, ОТ
Сигнал	ИТ, ОТ
Скорость	ИТ, ОТ
Скорость, «встречка»	ИТ, ОТ
Скорость, дистанция	ИТ, ОТ
Скорость, непредоставление преимущества	ИТ, ОТ
Скорость, обгон	ИТ, ОТ
Скорость, переход	ИТ, ОТ
Скорость, правила обгона	ИТ, ОТ
Скорость	ИТ, ОТ

Для каждого из видов ДТП по причине возникновения определены пострадавшие – пассажиры ИТ, ОТ или пешеходы. Соотношение участия ТС ИТ и ТС ОТ в данных ДТП примем пропорциональным количеству одновременно движущихся по УДС единиц подвижного состава транспортных средств различной принадлежности.

Далее построим статистику по количеству ДТП, погибших и раненых по видам транспорта. При этом важно учесть следующие случаи:

1. Если для данного вида ДТП пострадавшие – ИТ и ОТ, то и материальный ущерб, и количество погибших и раненых делятся пропорционально количеству одновременно движущихся по УДС единиц подвижного состава транспортных средств различной принадлежности.

2. Если для данного вида ДТП пострадавшие – пешеходы, то все погибшие и раненые относятся к пешеходам, а материальный ущерб относится к ОТ и ИТ также пропорционально количеству одновременно движущихся по УДС единиц подвижного состава транспортных средств различной принадлежности.

Таким образом, учитывается ущерб для каждого вида транспорта. В результате получена таблица 1.8.

Таблица 1.8

### Статистика ДТП по видам транспорта

	Всего ДТП с участием	Погибших	Раненых
Пешеходы	$DTP_{11}$	$DTP_{12}$	$DTP_{13}$
ОТ	$DTP_{21}$	$DTP_{22}$	$DTP_{23}$
ИТ	$DTP_{31}$	$DTP_{32}$	$DTP_{33}$

где  $DTP_{ij}$  – количество ДТП с пострадавшими типа  $i$  и последствиями типа  $j$ ; (1 – пешеход, 2 – пассажир ОТ, 3 – пассажир ИТ);  $j = 1..3$  (1 – всего ДТП, 2 – ДТП с погибшими, 3 – ДТП с ранеными).

Например,  $DTP_{11}$  – это общее количество ДТП с участием пешеходов,  $DTP_{32}$  – это количество ДТП с погибшими пассажирами ИТ и т.д.

Частотность возникновения ДТП в расчете на одного жителя города будет рассчитываться как:

$$P = \frac{P_1}{N_1} + \frac{P_2}{N_2} + \frac{P_3}{N_3} \quad (1.102)$$

где

$P$  – частотность возникновения ДТП, ДТП/чел./год;  $P_1$  – количество ДТП с участием пешеходов, ДТП/год;  $P_2$  – количество ДТП с участием пассажиров ОТ, ДТП/год;  $P_3$  – количество ДТП с участием пользователей ИТ, ДТП/год;  $N_1$  – количество жителей города, чел.;  $N_2$  – количество пользователей ОТ города, чел.;  $N_3$  – количество пользователей ИТ города, чел.

Таким образом, при расчете частотности возникновения риска ДТП учитывается именно та группа пользователей, которая рискует попасть в конкретный вид ДТП. Стоит еще раз отметить, что группы ДТП по видам

пострадавших формировались именно на основе причин ДТП, поэтому имеет смысл использовать разные знаменатели для каждого слагаемого. Так, например, в ДТП из числа  $P_1$  пострадавшие – пешеходы, поэтому не имеет смысла учитывать в данной группе ДТП дополнительно пассажиров ИТ и пассажиров ОТ. Аналогично в ДТП из числа  $P_2$  не принимают участия пешеходы (так как в этой группе находятся такие причины ДТП, как несоблюдение бокового интервала, выезд на встречную полосу движения), поэтому не имеет смысла учитывать пешеходов при расчете частотности возникновения ДТП данного типа.

С учетом статистики ДТП по видам транспорта, итоговый ущерб от всех ДТП за год на одного жителя города будет равен:

$$U = U_{N_0} \cdot \left( \frac{D_{11}}{N_1} + \frac{D_{12}}{N_2} + \frac{D_{13}}{N_3} \right) + U_{N_1} \cdot \left( \frac{D_{21}}{N_1} + \frac{D_{22}}{N_2} + \frac{D_{23}}{N_3} \right) + U_{N_2} \cdot \left( \frac{D_{31}}{N_1} + \frac{D_{32}}{N_2} + \frac{D_{33}}{N_3} \right) \quad (1.103)$$

где

$D_{1k}$  – число ДТП с материальным ущербом с видом транспорта  $k$ ;  $D_{2k}$  – число погибших в ДТП видом транспорта  $k$ ;  $D_{3k}$  – число раненых в ДТП видом транспорта  $k$ ;  $U_{N_0}$  – экономические потери от одного ДТП с материальным ущербом, руб.;  $U_{N_1}$  – экономические потери от одного ДТП с погибшими, руб.;  $U_{N_2}$  – экономические потери от одного ДТП с ранеными, руб.;  $N_1$  – количество жителей города, чел.;  $N_2$  – количество пользователей ОТ города, чел.;  $N_3$  – количество пользователей ИТ города, чел.

Значение  $U_{N_1}$  согласно исследования по формированию методики оценки стоимости среднестатистической жизни человека равняется 30 млн руб. Значения  $U_{N_2}$  и  $U_{N_0}$  выразим через  $U_{N_1}$ :

$$U_{N_0} = K^N \cdot U_{N_1}, \quad (1.104)$$

$$U_{N_2} = K^N \cdot U_{N_1}, \quad (1.105)$$

где  $K^N$  – коэффициент снижения ущербов;  $K^N$  для ДТП с материальным ущербом – 0,01;  $K^N$  для ДТП с легкими ранениями – 0,04; с тяжелыми ранениями – 0,07; с тяжелыми ранениями, приведшими к инвалидности – 0,7. Для расчетов примем среднее значение коэффициента – 0,07.

Повторим, что для нормирования правой и левой частей (приведения их к одному порядку и единицам измерения), мы вводим коэффициенты  $z$  и  $f$ . При этом для частотности возникновения ДТП коэффициент  $z$  общий для всех слагаемых, а для ущерба от ДТП будет свой коэффициент  $f_k$  для каждого слагаемого (т.е. вида транспорта  $k$ ).

Проведем расчет нормирующего коэффициента  $z$ . Правая часть ограничения по частотности возникновения ДТП рассчитана по существующей



статистике ДТП, то есть определена существующая частотность возникновения ДТП в расчете на одного жителя города. Далее для определения значения коэффициента  $z$  подставим в левую часть ограничения суммарные существующие объемы движения в реальной сети по видам транспорта для мест концентрации ДТП. Отношение правой и левой частей, рассчитанных для существующих объемов движения, и будут определять значение коэффициента  $z$ .

$$z = \frac{P}{\left( \frac{\sum_{i=1}^H q_{i1}}{N_1 \cdot v_1 \cdot w_1} + \frac{\sum_{i=1}^H q_{i2}}{N_2 \cdot v_2 \cdot w_2} + \frac{\sum_{i=1}^H q_{i3}}{N_3 \cdot v_3 \cdot w_3} \right)}, \quad (1.106)$$

где

$q_{ik}$  – существующий объем движения по реальной сети вида транспорта  $k$  в месте концентрации ДТП  $i$ , чел.;  $v_k$  – скорость движения транспортного средства типа  $k$ , км/ч;  $w_k$  – средняя вместимость транспортного средства типа  $k$ , чел/ед.;  $N_1$  – количество жителей города, чел.;  $N_2$  – количество пользователей ОТ города, чел.;  $N_3$  – количество пользователей ИТ города, чел.;  $z$  – нормирующий коэффициент, характеризующий частотность возникновения ДТП на исследуемой территории, км/ч/ед.;  $H$  – количество мест концентрации ДТП в представленной ГИБДД статистике по российскому городу с населением 1 млн. жителей на примере города Перми.

Расчет коэффициентов  $f_k$  происходит аналогично, но отдельно для каждого типа перемещений:

$$f_1 = \frac{\frac{D_{11}}{N_1} \cdot U_{N0} + \frac{D_{21}}{N_1} \cdot U_{N1} + \frac{D_{31}}{N_1} \cdot U_{N2}}{\sum_{i=1}^H q_{i1}} \quad (1.107)$$

$$\frac{N_1 \cdot v_1 \cdot w_1}{N_1 \cdot v_1 \cdot w_1}$$

$$f_2 = \frac{\frac{D_{12}}{N_2} \cdot U_{N0} + \frac{D_{22}}{N_2} \cdot U_{N1} + \frac{D_{32}}{N_2} \cdot U_{N2}}{\sum_{i=1}^H q_{i2}} \quad (1.108)$$

$$\frac{N_2 \cdot v_2 \cdot w_2}{N_2 \cdot v_2 \cdot w_2}$$

$$f_3 = \frac{\frac{D_{13}}{N_3} \cdot U_{N0} + \frac{D_{23}}{N_3} \cdot U_{N1} + \frac{D_{33}}{N_3} \cdot U_{N2}}{\sum_{i=1}^H q_{i3}} \quad (1.109)$$

$$\frac{N_3 \cdot v_3 \cdot w_3}{N_3 \cdot v_3 \cdot w_3}$$

где

$q_{ik}$  – существующий объем движения по реальной сети вида транспорта  $k$  в месте концентрации ДТП  $i$ , чел.;  $v_k$  – скорость движения транспортного средства типа  $k$ , км/ч;  $w_k$  – средняя вместимость транспортного средства типа  $k$ , чел/ед.;  $D_{1k}$  – число ДТП с материальным ущербом с видом транспорта  $k$ ;  $D_{2k}$  – число погибших в ДТП видом транспорта  $k$ ;  $D_{3k}$  – число раненых в ДТП видом транспорта  $k$ ;  $U_{N0}$  – экономические потери от одного ДТП с материальным ущербом, руб.;  $U_{N1}$  – экономические потери от одного ДТП с погибшими, руб.;  $U_{N2}$  – экономические потери от одного ДТП с ранеными, руб.;  $N_1$  – количество жителей города, чел.;  $N_2$  – количество пользователей ОТ города, чел.;  $N_3$  – количество пользователей ИТ города, чел.;  $f_1$  – нормирующий коэффициент, характеризующий ущерб от ДТП с участием пешеходов, руб км/ч/ед.;  $f_2$  – нормирующий коэффициент, характеризующий ущерб от ДТП с участием пассажиров ОТ, руб км/ч/ед.;  $f_3$  – нормирующий коэффициент, характеризующий ущерб от ДТП с участием пассажиров ИТ, руб км/ч/ед.;  $H$  – количество мест концентрации ДТП в представленной ГИБДД статистике по российскому городу с населением 1 млн жителей на примере города Перми.

#### 1.3.3.8.4. Постановка ограничения по риску ДТП для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми

Значения параметров  $V_s$  для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми приведены в таблице 1.9.

Таблица 1.9

#### Значения скорости $V_s$ по видам транспорта

Вид транспорта	Скорость $V_s$ , км/ч
Пешком, $V_1$	4
ОТ, $V_2$	18
ИТ, $V_3$	24

Значения параметров приняты те же, что и в остальных ограничениях:

$$w_1 = 1; w_2 = 40; w_3 = 1,4;$$

Количество ДТП в год с разбиением по местам их концентрации для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми представлено в таблице 1.10.

Таблица 1.10

## Статистика ДТП по местам концентрации ДТП

Номер места концентрации ДТП	Вид ДТП	Всего ДТП	Раненые	Погибшие
1	Боковой интервал	6	0	0
2	«Встречка»	6	3	1
3	«Встречка»	4	6	4
4	«Встречка»	4	5	1
5	«Встречка»	3	3	0
6	«Встречка», выход	5	8	0
7	«Встречка», выход	11	18	2
8	«Встречка», выход	3	3	1
9	«Встречка», выход	6	7	1
10	«Встречка», скорость	3	2	1
11	«Встречка», скорость	18	0	0
12	Выход	0	3	0
13	Дистанция	20	6	0
14	Дистанция	7	4	0
15	Дистанция	4	5	2
16	Дистанция	8	5	1
...	...	...	...	...

Определим соотношение участия в ДТП подвижного состава ИТ и ОТ для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми. Для ИТ количество одновременно движущихся единиц подвижного состава составляет примерно 17000 единиц, для ОТ – 1000 единиц. Таким образом, примерное соотношение количества единиц подвижного состава ИТ и ОТ одновременно движущегося по УДС города составляет 17 к 1. Соответственно, частотность возникновения ДТП того или иного вида для пассажира ИТ и ОТ будет также отличаться в 17 раз.

Исходя из данных соображений, на основе представленной статистики ДТП была получена статистика ДТП для каждого вида перемещения для всего города, т.е. были получены значения параметров (табл. 11).

Так, значение  $DTP_{11} = 382$ ,  $DTP_{12} = 10$  и т.д.

Таблица 1.11

**Статистика ДТП по видам перемещения для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми**

	Всего ДТП с участием	Погибших	Раненых
Пешеходы	382	10	91
Пассажиры ОТ	198	3	23
Пассажиры ИТ	3339	58	397

На основе полученной статистики для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми были получены следующие значения коэффициентов  $z$  и  $f_k$  (табл. 1.12):

$z$  – коэффициент, характеризующий частотность возникновения ДТП в расчете на одного жителя города;  $f_k$  – коэффициент, характеризующий ущерб от ДТП на одного жителя города для типа перемещения  $k$ .

Таблица 1.12

**Значения коэффициентов  $z$  и  $f_k$  для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми**

Параметр	$z_r$
$z$	0,0000025369
$f_1$	0,484
$f_2$	0,770
$f_3$	3,300

Количество пользователей ОТ для зоны  $r$  определяется как:

$$N_{2r} = \frac{1}{\alpha} \cdot B_r \cdot \frac{N_{1r}}{N_1} \quad (1.110)$$

где

$N_{2r}$  – количество пользователей ОТ в зоне  $r$ ;  $N_{1r}$  – количество жителей в зоне  $r$ ;  $N_1$  – количество жителей в российском городе с населением 1 млн жителей на примере города Перми;  $B$  – количество проданных за сутки билетов в российском городе с населением 1 млн жителей на примере города Перми;  $\alpha$  – коэффициент пересадочности (по данным натурных обследований и опросов населения).

Количество пользователей ИТ для зоны  $r$  определяется как:

$$N_{3r} = 0,5 \cdot 1,4 \cdot A_r, \quad (1.111)$$

где

$N_{3r}$  – количество пользователей ИТ в зоне  $r$ ;  $A_r$  – количество зарегистрированных в зоне  $r$  автомобилей.

При этом стоит отметить, что в общем случае  $N_2 + N_3 \neq N_I$ , так как одни и те же люди могут быть учтены и в  $N_2$ , и в  $N_3$ . Например, для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми разность между  $(N_2 + N_3)$  и  $N_I$  составляет примерно 3%, то есть 3% населения российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми регулярно пользуются и ОТ, и ИТ.

Полученное для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми значение частотности возникновения ДТП на одного жителя составляет:

$$P = 0,0201889 \text{ ДТП/чел./год.}$$

Полученное для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми значение ущерба от всех произошедших за год ДТП на одного жителя города составляет:

$$U = 20598,4767 \text{ руб/чел./год.}$$

Таким образом, ограничение по частотности возникновения ДТП и ущербу от ДТП будет иметь вид:

$$0,0000025369 \cdot \left( \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot 5 \cdot 1} + \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot 18 \cdot 40} + \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot 24 \cdot 1,4} \right) \leq 0,0201889 \quad (1.112)$$

$$0,484 \cdot \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot 5 \cdot 1} + 0,77 \cdot \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot 18 \cdot 40} + 3,3 \cdot \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot 24 \cdot 1,4} \leq 20598,48 \quad (1.113)$$

### 1.3.4. Оптимальная модель формирования эффективной транспортной системы российского города на примере города Перми

Для поставленной модели оптимизационной задачи распределения транспортного спроса невозможно найти аналитическое решение в общем виде. В связи с этим, будем находить численное решение модели оптимизационной задачи для конкретных значений, характеризующих транспортную систему российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми.

Строить и решать оптимальную модель формирования эффективной транспортной системы крупного города в первом приближении будем для

трех способов передвижений:

- пешком;
- на общественном транспорте;
- на индивидуальном транспорте.

Каждый из способов перемещений в каждой зоне будет рассматриваться в зависимости от типа перемещения:

- АВ – транзит;
- ВС – въезд в зону;
- CD – внутреннее движение в зоне.

В качестве набора ограничений, накладываемых на целевую функцию, будем использовать шесть типов ограничений:

- ограничение по протяженности существующей улично-дорожной сети;
- ограничение по спросу на перемещение в исследуемых областях;
- экологическое ограничение;
- ограничение по рискам возникновения ДТП;
- ограничение по имеющемуся подвижному составу;
- ограничение по уровню транспортного шума.

Каждый тип ограничений представляет собой набор неравенств следующих видов:

Рассмотрим следующие виды ограничений.

#### **По спросу на перемещение в исследуемых областях.**

Ограничения по спросу на перемещение в исследуемых областях будут иметь следующий вид:

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3} \geq G_{rs} \quad (1.114)$$

где

$l_{rs}$  – средняя длина всех корреспонденций, проходящих через область исследования по типу  $s$  (км);  $G_{rs}$  – транспортная зависимость области  $r$  по типу  $s$  (чел·км).

Значения параметров  $l_{rs}$  и  $G_{rs}$  для российского города с населением 1 млн. жителей на примере города Перми представлены в таблицах 1.2, 1.3.

#### **Экологическое ограничение**

Экологическое ограничение на передвижения по исследуемым областям будут иметь следующий вид:

$$\frac{1}{N_r} (a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3}) \leq D \quad (1.115)$$

где:

$D$  – предельный суточный объем расхода топлива (энергии) на одного жите-

ля города в сутки, Дж/чел.;  $a_1$  – удельный расход энергии, требуемый на перемещение одного человека на 1 км пешком ( $a_1 = 0$ );  $a_2$  – удельный расход энергии, требуемый на перемещение одного человека на 1 км на ОТ (Дж/км/чел.);  $a_3$  – удельный расход энергии, требуемый на перемещение одного человека на 1 км на ИТ (Дж/км/чел.);  $N_r$  – количество жителей зоны  $r$ , чел.

### Ограничение по протяженности существующей улично-дорожной сети.

Ограничения по протяженности существующей улично-дорожной сети для области исследования имеют вид:

$$\frac{1}{p_2 w_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{p_3 w_3} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, \quad (1.116)$$

где:

$L_r$  – суммарная длина проезжих частей дорог в области  $r$ ;  $p_2$  – плотность транспортного потока ОТ при скорости  $v_2$  (авто/км);  $p_3$  – плотность транспортного потока ИТ при скорости  $v_3$  (авто/км);  $w_2$  – среднее количество человек, перевозимых на одном транспортном средстве ОТ, (средняя вместимость транспортного средства);  $w_3$  – среднее количество человек, перевозимых на одном транспортном средстве ИТ.

Значения параметра  $L_r$  для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми представлены в таблице 1.4.

### Ограничение по риску возникновения дорожно-транспортных происшествий (ДТП).

$$z \cdot \left( \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \right) \leq P \quad (1.117)$$

$$f_1 \cdot \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + f_2 \cdot \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + f_3 \cdot \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \leq U \quad (1.118)$$

где

$P$  – частотность возникновения ДТП в расчете на одного жителя города, ДТП/чел./год;  $U$  – ущерб от ДТП в расчете на одного жителя города, руб./чел./год;  $X_{rsk}$  – количество корреспонденций, совершаемых через зону  $r$  по типу  $s$  видом транспорта  $k$ , чел.;  $v_k$  – скорость движения транспортного средства типа  $k$ , км/ч;  $w_k$  – средняя вместимость транспортного средства типа  $k$ , чел/ед.;  $N_{1r}$  – количество жителей в зоне  $r$ , чел.;  $N_{2r}$  – количество пользователей ОТ в зоне  $r$ , чел.;  $N_{3r}$  – количество пользователей ИТ в зоне  $r$ , чел.;  $z$  – нормирующий коэффициент, характеризующий частотность возникновения ДТП в расчете на одно транспортное средство, км/ч/ед.,  $f_k$  – нормирующий коэффициент, характеризующий ущерб от ДТП для кор-

респондентов, совершаемых на транспортном средстве типа  $k$  в расчете на одно транспортное средство, руб км/ч/ед.;  $s$  – тип прохождения через зону: транзит, въезд, внутреннее движение,  $s = 1, 2, 3$ .

### Ограничение по имеющемуся подвижному составу.

Ограничение по имеющемуся подвижному составу будет иметь вид:

$$\frac{1}{u_2 \cdot z_2 \cdot kl_2} \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \leq OT \quad (1.119)$$

$$\frac{1}{w_3 \cdot z_3} \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq ИТ \quad (1.120)$$

где

$OT$  – количество единиц подвижного состава общественного транспорта, который используется в единой маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования, авт.;  $ИТ$  – количество зарегистрированного в городе индивидуального транспорта, авт.;  $u_2$  – средний пассажирооборот единицы транспортного средства общественного транспорта за один оборотный рейс, чел./рейс;  $z_2$  – среднее количество оборотных рейсов на единицу подвижного состава общественного транспорта, рейс/авт.;  $kl_2$  – коэффициент выхода подвижного состава на линию;  $w_3$  – средняя вместимость транспортного средства ИТ, чел/авт.;  $z_3$  – среднее количество поездок на ИТ одного человека в сутки, рейс.

### Ограничение по уровню шума.

Для удобства использования ограничения по уровню шума в постановке оптимизационной задачи оно было преобразовано к линейному виду:

$$\frac{s_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8,25}} \left( \frac{\sum X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum X_{rs3}}{w_3} \right) \leq SR \quad (1.121)$$

где

$SR$  – среднее значение энергии воздействия шума, приходящейся на одного жителя города в сутки, Вт/чел.;  $dh$  – коэффициент приведения от часа пик к суткам;  $s_r$  – площадь территории, прилегающей к УДС в зоне и попадающей под воздействие шума транспортных потоков, м<sup>2</sup>;  $N_r$  – количество жителей зоны  $r$ , чел.

Целевая функция будет иметь вид:

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{v_1} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs1} + \frac{1}{v_2} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs2} + \frac{1}{v_3} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \rightarrow \min \quad (1.122)$$

Описанные выше ограничения и целевая функция позволяют построить оптимальную модель формирования эффективной транспортной системы



города. В общем виде модель имеет следующую запись:

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{v_1} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs1} \cdot \frac{1}{v_2} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs2} \cdot \frac{1}{v_3} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \rightarrow \min \quad (1.123.1)$$

$$\begin{aligned} l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3} &\geq G_{rs}, \\ r &= 1, 2, \dots, E, s = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (1.123.2)$$

$$\frac{1}{N_r} \left( a_2 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + a_3 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \leq D, r = 1, 2, \dots, E \quad (1.123.3)$$

$$\frac{1}{p_2 w_2} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{p_3 w_3} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, r = 1, 2, \dots, E \quad (1.123.4)$$

$$z \cdot \left( \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \right) \leq P, \quad (1.123.5)$$

$$r = 1, 2, \dots, E$$

$$f_1 \cdot \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} + f_2 \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} + f_3 \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \leq U, \quad (1.123.6)$$

$$r = 1, 2, \dots, E$$

$$\frac{S_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8,25}} \left( \frac{\sum_s X_{rs2}}{w_2} + \frac{\sum_s X_{rs3}}{w_3} \right) \leq SR, r = 1, 2, \dots, E \quad (1.123.7)$$

$$\frac{1}{u_2 \cdot z_2 \cdot kl_2} \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \leq OT \quad (1.123.8)$$

$$\frac{1}{w_3 \cdot z_3} \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq IT \quad (1.123.9)$$

$$X_{rs1} \geq 0, X_{rs2} \geq 0, X_{rs3} \geq 0 \quad r = 1, 2, \dots, E, s = 1, 2, 3 \quad (1.123.10)$$

Количество переменных модели (1.123.1) – (1.123.10) -  $3 \cdot S \cdot E$ .

Количество ограничений типа (1.123.2) – 1.123.9) -  $S \cdot E + 3E$ .

Постановка задачи для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми с учетом рассчитанных значений параметров и коэффициентов имеет вид следующей математической модели:

$$Z = \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 \left( \frac{1}{4} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs1} \cdot \frac{1}{18} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs2} \cdot \frac{1}{37,8} \cdot l_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \rightarrow \min \quad (1.124.1)$$

$$\frac{1}{1596} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs2} + \frac{1}{112,28} \cdot \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq L_r, r = \overline{1..10} \quad (1.124.2)$$

$$\frac{1}{N_r} (0,08 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs2} + 0,757 \cdot \sum_{s=1}^3 l_{rs} \cdot X_{rs3}) \leq 18,753, \\ r = \overline{1..10} \quad (1.124.3)$$

$$l_{rs} \cdot X_{rs1} + l_{rs} \cdot X_{rs2} + l_{rs} \cdot X_{rs3} \geq G_{rs}, \\ r = \overline{1..10}, s = 1, 2, 3 \quad (1.124.4)$$

$$0,0000025369 \left( \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot 5 \cdot 1} + \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot 18 \cdot 40} + \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot 24 \cdot 1,4} \right) \leq 0,0201889 \quad (1.124.5)$$

$$0,484 \sum_s \frac{X_{rs1}}{N_{1r} \cdot 5 \cdot 1} + 0,77 \sum_s \frac{X_{rs2}}{N_{2r} \cdot 18 \cdot 40} + 3,3 \sum_s \frac{X_{rs3}}{N_{3r} \cdot 24 \cdot 1,4} \leq 20598,48 \\ r = \overline{1..10} \quad (1.124.6)$$

$$\frac{S_r \cdot 0,1}{N_r \cdot 10^{8,25}} \left( \frac{\sum_s X_{rs2}}{40} + \frac{\sum_s X_{rs3}}{1,4} \right) \leq 0,001573346, \\ r = 1, 2 \dots E \quad (1.124.7)$$

$$0,00042 \cdot \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs2} \leq 1000 \quad (1.124.8)$$

$$0,2381 \cdot \sum_{r=1}^{10} \sum_{s=1}^3 X_{rs3} \leq 285000 \quad (1.124.9)$$

$$X_{rs1} \geq 0, X_{rs2} \geq 0, X_{rs3} \geq 0 \quad r = \overline{1..10}, s = 1, 2, 3 \quad (1.124.10)$$

Количество переменных модели для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми – 90.

Количество ограничений для российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми – 72.

#### 1.4. Поиск решения оптимизационной задачи

Решение оптимальной модели формирования эффективной транспортной системы российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми осуществлено с использованием надстройки Solver (Поиск решения) программы Excel компании Frontline System. При решении будем использовать нелинейный метод обобщенного понижающего градиента (ОПГ). Данный метод используется для гладких нелинейных задач. В нашем случае из-за существенной нелинейности в группе ограничений, связанных с ограничениями вероятности рисков ДТП, вся математическая

модель является нелинейной.

Процедура поиска решения проводилась при следующих параметрах работы алгоритма поиска:

- Предельное число итераций – 20000;
- Относительная погрешность – 0,000001;
- Допустимое отклонение - 0,005%;
- Сходимость – 0,000001.

Решение оптимальной модели формирования эффективной транспортной системы российского города с населением 1 млн жителей на примере города Перми осуществлено с использованием алгоритма симплекс-метода.

Общий объем времени, необходимый для оптимального удовлетворения имеющихся в городе транспортных потребностей, для всех людей (значение целевой функции) составляет – **995 406 час** в суточном цикле транспортных потребностей, что на **35%** меньше показателя существующего объема времени – **1 546 779** часов. Это достигается путем изменения существующего в городе распределения транспортного спроса по различным способам перемещений, при сохранении существующего объема транспортного предложения и основных параметров среды обитания – уровня вреда от ДТП, сжигания моторного топлива, приводящего к загрязнению атмосферного воздуха токсичными и вредными веществами, включая парниковые газы, а также повышенного уровня транспортного шума в пересчете на одного жителя города.

Таблица 1.13

### Значения найденных переменных для зон 1-5

Вид перемещений	Тип прохождения зоны	Номер зоны				
		1	2	3	4	5
Пешеходы	AB	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0
	CD	0	0	0	0	0
ОТ	AB	0	0	0	0	4 168
	BC	304 225	500 514	212 630	325 132	189 739
	CD	87 462	0	0	49 526	31 161
ИТ	AB	77 513	87 545	23 672	39 098	42 037
	BC	88 732	17 589	67 898	0	0
	CD	0	257 686	54 378	54 748	0

Таблица 1.14

## Значения найденных переменных для зон 6-10

Вид перемещений	Тип прохождения зоны	Номер зоны				
		6	7	8	9	10
Пешеходы	AB	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0
	CD	0	0	0	0	0
ОТ	AB	7 600	0	0	76 541	78 941
	BC	0	64 363	23 863	48 227	40 219
	CD	19 156	0	0	944	1 619
ИТ	AB	8 503	8 040	0	0	23 025
	BC	173 376	79 036	2 628	19 061	0
	CD	115 181	198 931	0	0	0

## 1.5. Оптимальная модель двойственной задачи

В практическом плане прикладной интерес вызывает решение соответствующей двойственной задачи линейного программирования. Этим решением впервые создан инструмент, позволяющий оценить имеющиеся в распоряжении сообщества различные ресурсы, с точки зрения их запасов и вклада (влияния) на эффективность транспортной системы города, а следовательно, и качество жизни. Этими ресурсами являются входящие в оптимизационную задачу ограничения развития транспортных систем – объемы инфраструктуры различных систем транспорта, предельные уровни загрязнения атмосферы и шумового загрязнения территории. В конечном итоге именно управление имеющимися ресурсами есть единственный инструмент улучшения, как качества жизни на территории, так и качества функционирования действующей на территории транспортной системы.

Для линейной оптимальной модели может быть построена двойственная задача. Решив двойственную задачу, можно выявить закономерности влияния того или иного ограничения на значение целевой функции.

Переменные двойственной задачи обозначим как  $Y_k$ , где  $k$  – номер ограничения в постановке прямой задачи. Тогда постановка двойственной задачи примет вид:

$$F = \sum_{r=1}^E L_r Y_r + \sum_{r=1}^E D Y_{E+r} + \sum_{r=1}^E \sum_{s=1}^3 (-G_{rs} Y_{2E+3(r-1)+s}) + OT \cdot Y_{5E+1} + IT \cdot Y_{5E+2} + \\ + SR \cdot \sum_{r=1}^E Y_{5E+2+r} + \sum_{r=1}^E U Y_{6E+2+r} + \sum_{r=1}^E P Y_{7E+2+r} \rightarrow \max \quad (1.125.1)$$

$$-l_{rs} Y_{2E+3(r-1)+s} + \frac{z}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} \cdot Y_{r+6E+2} + \frac{f_1}{N_{1r} \cdot v_1 \cdot w_1} \cdot Y_{r+7E+2} \geq \frac{1}{v_1} \cdot l_{rs}, \quad (1.125.2) \\ r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3;$$

$$\frac{1}{p_2 w_2} \cdot Y_r + \frac{1}{N_r} \cdot a_2 \cdot l_{rs} \cdot Y_{r+E} - l_{rs} \cdot Y_{r+2E} + \frac{1}{u_2 z k l_2} Y_{3E} + \frac{s_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8.25}} \cdot \frac{1}{w_2} Y_{r+3E+2} + \\ + \frac{z}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} \cdot Y_{r+6E+2} + \frac{f_2}{N_{2r} \cdot v_2 \cdot w_2} \cdot Y_{r+7E+2} \geq \frac{1}{v_2} \cdot l_{rs}, \quad (1.125.3) \\ r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3;$$

$$\frac{1}{p_3 w_3} \cdot Y_r + \frac{1}{N_r} \cdot a_3 \cdot l_{rs} \cdot Y_{r+E} - l_{rs} \cdot Y_{r+2E} + \frac{1}{w_3 z_3} Y_{3E+1} + \frac{s_r \cdot dh}{N_r \cdot 10^{8.25}} \cdot \frac{1}{w_3} Y_{r+3E+2} + \\ + \frac{z}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \cdot Y_{r+6E+2} + \frac{f_3}{N_{3r} \cdot v_3 \cdot w_3} \cdot Y_{r+7E+2} \geq \frac{1}{v_3} \cdot l_{rs}, \quad (1.125.4) \\ r = 1, 2, \dots, E, \quad s = 1, 2, 3;$$

Оптимальная модель двойственной задачи для г. Перми с учетом рассчитанных значений различных параметров и коэффициентов приведена в [1].

### Решение двойственной задачи

Исключительное значение для решения оптимизационной задачи формирования эффективной транспортной системы крупного города имеет самостоятельный анализ решения двойственной задачи (1.125.1) – (1.125.4). Рассмотрим некоторые особенности анализа решения двойственной задачи подробнее. Рассмотрим только те ограничения, которые содержат в себе ненулевые решения (значения  $Y_j$ ) и оценим их влияние на целевую функцию. Диаграммы, описывающие влияние всех, входящих в модель ограничений, на целевую функцию, приведены в Приложении 1.

Переменные  $Y_j$  при коэффициенте  $-G_{rs}$ , участвующие в целевой функции двойственной задачи со знаком «минус», соответствуют «верхним» ограничениям модели, ограничениям по транспортной зависимости территории (рис. 1.26). В двойственной задаче они оценивают влияние величины транспортной зависимости территории на целевую функцию. Физически это будет означать, что если увеличится транспортная зависимость области  $r$  по одному из типов корреспонденций  $s$  ( $G_{rs}$ ) на единицу, то на величину соответствующих переменных  $Y_r$  увеличится суммарное время совершения корреспонденций всех участников движения в транспортной системе.

Транспортная зависимость есть показатель, напрямую формирующий объем транспортного движения на исследуемой территории, и в общем случае, именно она определяет итоговое перераспределение транспортных потоков по УДС. Можно сказать, что  $Y_i$  оценивает влияние спроса на суммарное время осуществления транспортных корреспонденций. Особое внимание следует уделить тем областям  $r$ , где двойственные оценки  $Y_i$  наибольшие. Это наиболее загруженные территории, увеличение спроса в этих областях существенно повлияет на увеличение суммарного времени совершения корреспонденций. Там же, где двойственные оценки  $Y_i$  минимальны, есть резервы увеличения транспортного спроса, т.е. в этих областях транспортное предложение превышает транспортный спрос.



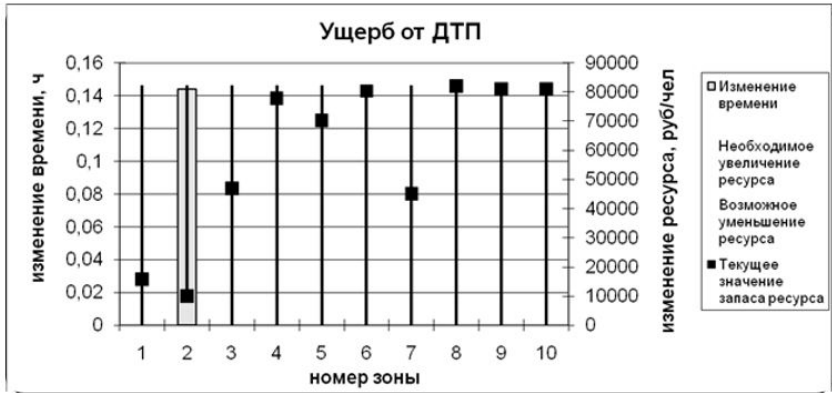
**Рис. 1.26.** Влияние ограничения по спросу на перемещение на целевую функцию. Анализ устойчивости решения по спросу на перемещение

Переменные  $Y_i$  при коэффициенте  $D_r$ , участвующие в целевой функции двойственной задачи со знаком «плюс», соответствуют «нижним» ограничениям модели, ограничениям по предельной экологической нагрузке в области  $r$ , они оценивают влияние величины предельной экологической нагрузки на целевую функцию (рис. 1.27). Например, если удастся увеличить (уменьшить) предельную экологическую нагрузку области  $r$  ( $D_r$ ) на единицу, то на величину  $Y_i$  уменьшится (увеличится) суммарное время совершения корреспонденций всех участников движения за счет перераспределения транспортных потоков. Такой анализ интересен, например, при проведении мероприятий по нормированию объемов выбросов загрязняющих веществ предприятиями, расположенными в черте города.

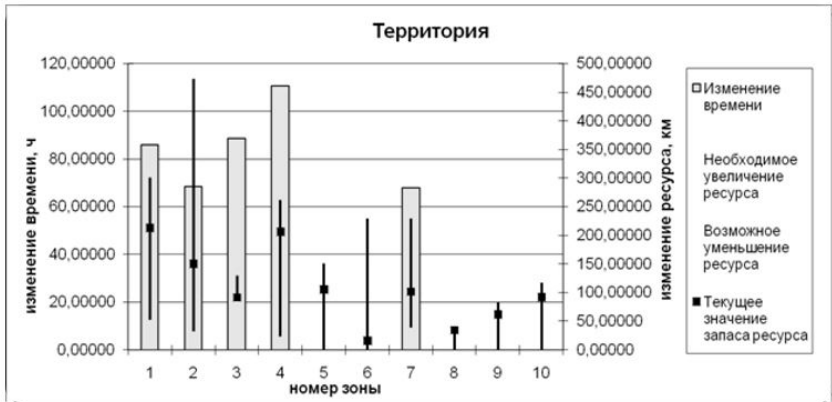
Конечно, в идеале следует рассматривать вариант уменьшения предельной экологической нагрузки на каждую территорию, очевидно, что вследствие этого суммарное время совершения транспортных корреспонденций

увеличится.

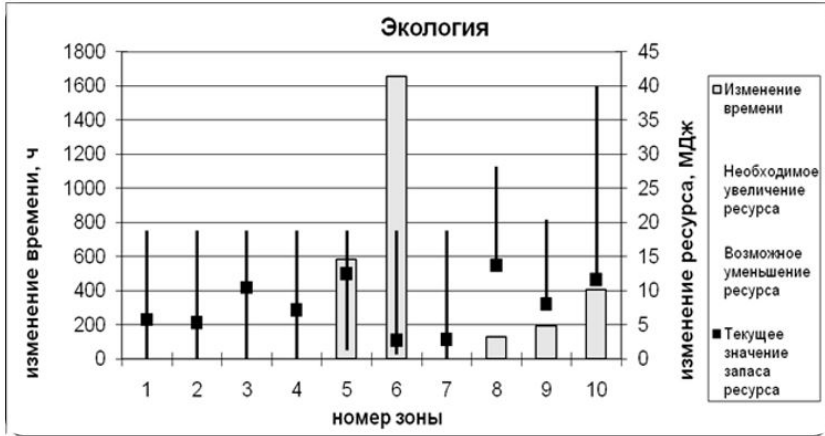
Для областей  $r$ , где двойственная оценка  $Y_i > 0$ , экологическая составляющая достигает предельного значения  $D_r$ . Эти области экологически наиболее уязвимы. Для тех областей  $r$ , где двойственная оценка  $Y_i = 0$ , экологическая составляющая в норме: загрязнения окружающей среды выбросами автомобильного транспорта не достигают предельного значения.



**Рис. 1.27.** Влияние экологического ограничения на целевую функцию. Анализ устойчивости решения по экологическим ограничениям.



**Рис. 1.28.** Влияние ограничения по УДС на целевую функцию. Анализ устойчивости решения по ограничениям УДС



**Рис. 1.29.** Влияние ограничения по ущербу от ДТП на целевую функцию.  
Анализ устойчивости решения по ущербу от ДТП

Переменные  $Y_i$  при коэффициенте  $L_i$  также участвуют в целевой функции со знаком «плюс» и соответствуют «нижним» ограничениям модели, ограничениям по длине проезжих частей автомобильных дорог (рис. 1.28-1.29). Они оценивают влияние длины проезжих частей дорог исследуемой области на целевую функцию. Например, если в области  $r$  увеличить длину проезжих частей улиц и дорог ( $L_i$ ) на единицу (на 1 км), то на величину  $Y_i$  уменьшится суммарное время совершения всех транспортных корреспонденций во всем городе. Если переменные  $Y_i = 0$ , то в соответствующей области  $r$  есть резервы пропускной способности УДС, и строить новые участки автомобильных дорог в исследуемой области нецелесообразно. Если  $Y_i > 0$ , то в соответствующей области  $r$  автомобильные дороги используются полностью, и для уменьшения суммарного времени совершения всех транспортных корреспонденций во всем городе необходимо вводить в эксплуатацию дополнительные элементы УДС именно в этой зоне. Очевидно, что, в первую очередь, ввод дополнительных провозных мощностей автомобильных дорог и проезжих частей улиц необходим в тех областях  $r$ , которым соответствует наибольшее значение двойственной оценки  $Y_i$ . Например, решение двойственной модели для города Перми показало, что наиболее эффективными с точки зрения сокращения суммарного времени реализации транспортных корреспонденций, будут являться мероприятия по развитию УДС в 4-й зоне. Каждый новый километр, введенный в эксплуатацию в этой зоне, сократит суммарное суточное время реализации корреспонденций в городе на 110 часов, а предельный объем ввода новых дорог в этой зоне не должен превышать 50 км.

Двойственные оценки представляют собой уникальный инструмент для



принятия обоснованных управленческих решений в области транспортно-го планирования и организации дорожного движения в городе. На основе анализа значений двойственных оценок представленных моделей можно принимать обоснованные решения о строительстве или ограничении движения на отдельных участках УДС города в той или иной области, точно представляя при этом, как изменение транспортных потоков повлияет на исследуемый показатель суммарной скорости движения транспортных потоков. В итоге, зная подобные оценки каждого из потребляемых ресурсов, а также объемы имеющихся в распоряжении сообщества финансовых ресурсов можно сформировать экономически обоснованную программу мероприятий по повышению эффективности функционирования городской транспортной системы.

## **2. Практическая реализация алгоритма моделирования в программном комплексе STSDsysR**

### **2.1. Описание функциональных характеристик программного обеспечения STSDsysR**

#### **2.1.1. Общие сведения**

Программный комплекс STSDsysR разработан ООО «Агентство дорожной информации РАДАР», зарегистрирован в государственном реестре программ для ЭВМ Российской Федерации (свидетельство о регистрации №2017617012 от 21.06.2017). Реестровая запись в реестре российского программного обеспечения №11515 от 20.09.2021. Программный комплекс STSDsysR (Scenario Transport System Development) является системой для создания оптимизационных транспортных моделей. Данный класс транспортных моделей предназначен для формирования новых сценариев развития транспортной системы крупного и крупнейшего города.

Выпуск обновлений осуществляется по запросу пользователей при выявлении ошибок в ходе эксплуатации программного комплекса.

Прием и обработка обращений, связанных со сбоями в работе программного комплекса, а также предложений по доработке функционала программного комплекса производится по рабочим дням с понедельника по пятницу (кроме праздничных) с 9:00 до 15:00 по Московскому времени по адресу [roadperm@mail.ru](mailto:roadperm@mail.ru)

Программное обеспечение обладает общесистемными функциями:

1) Авторизация и аутентификация – функции создания пользователей программного продукта и определения доступных им прав на данные и функционал программного продукта. Данные функции реализуются через пару логин/пароль, вводимых пользователями при запуске программного продукта. Определение прав доступа основывается на ролевой модели.

2) Для возможности создания, редактирования пользователей, а также настройки прав на модули, компоненты, доступные им, в программном продукте реализован инструмент, состоящий из следующих разделов:

а) Информация о пользователе с редактируемыми администратором следующими полями:

- Логин;
- Пароль;
- Электронная почта;
- Фамилия, Имя, Отчество;

в) Модули и компоненты. В данном разделе администратор имеет возможность гибкой настройки доступных пользователю функциональностей из всего доступного перечня.

г) Для возможности управления предусмотрена реализация специального инструмента, агрегирующего в себе следующие функциональные разделы:

- Управление существующими источниками данных. В данном разделе реализована возможность отображения всех источников данных, доступных пользователю, изменения названия источника, изменения наименований атрибутов, а также удаление источника из программного продукта;

- Создание источника данных из файла. В данном разделе реализована возможность создания загрузки уже имеющихся источников в виде файлов в следующих форматах: .json; .geojson; .csv; .net; .shp. При импорте файлов создана модель в соответствии с типовой структурой транспортной модели в специализированном ПО, предназначенное для моделирования транспортных потоков. Для этого в пустой модели данных присутствуют следующие типы источников данных: Отрезок; Узел; Район; Примыкание.

### **2.1.2. Интерфейс, размерность транспортной сети, экспорт и импорт данных**

Программное обеспечение позволяет создавать и использовать в работе следующее количество объектов сети (не менее):

- неограниченное количество отрезков;
- неограниченное количество узлов;
- неограниченное количество районов;
- неограниченное количество примыканий;
- неограниченное количество остановочных пунктов;
- неограниченное количество матриц (затрат и корреспонденций).

Программное обеспечение обеспечивает возможность выполнения следующих функций:

- хранение и обработка пространственных/картографических данных;
- загрузка пространственных/картографических данных из внешних источников;
- поиск картографических объектов;
- визуализация картографической подложки;
- визуализация пространственных/картографических данных;
- модификация/редактирование картографических данных (точечных, линейных, полигональных).

Работа с программным обеспечением, включая ввод, редактирование и удаление исходных данных, настройку графики, отображение объектов и их атрибутов, а также другие работы в среде используемого программного обеспечения осуществляются с помощью современного графического пользовательского интерфейса.

Интерфейс программного обеспечения понятный и удобный, выполнен

в виде веб-приложения и не перегружен графическими элементами. Навигационные элементы выполнены в удобной для пользователя форме. Ввод – вывод данных, прием управляющих команд и отображение результатов их исполнения выполняются в интерактивном режиме.

Интерфейс рассчитан на преимущественное использование манипулятора типа «мышь», то есть управление программным обеспечением осуществляется с помощью набора экранных меню, кнопок, значков и т. п. элементов. Клавиатурный режим ввода используется главным образом при заполнении и/или редактировании текстовых и числовых полей экранных форм. Все надписи экранных форм, а также сообщения, выдаваемые пользователю (допускаются исключения системных сообщений об ошибках), представлены на русском языке.

Граф транспортной сети является единым для всех перемещений вне зависимости от вида транспорта. Используемый программным обеспечением граф транспортной сети представлен в формате «узел-отрезок-узел» со следующим минимальным набором атрибутов:

а) Для отрезков:

Номер отрезка, Тип отрезка, Разрешенные системы транспорта, Кратчайшее расстояние между узлами, Длина полигона, Название отрезка, Разрешенная скорость, Количество полос, Пропускная способность, Время прохождения по системам транспорта с учетом и без учета нагрузки, Скорость по системам транспорта с учетом нагрузки.

б) Для узлов:

Номер узла, Название узла, Тип регулирования, Координата X, Координата Y, Количество подходов, Разрешаемые повороты по системам транспорта, Скорость поворота по системам транспорта с учетом и без учета нагрузки, Время прохождения по системам транспорта с учетом и без учета нагрузки.

Сеть общественного транспорта представлена следующим набором связанных с графом сети объектов с соответствующим им минимальным набором атрибутов.

в) Остановки общественного транспорта. Минимальный набор атрибутов остановок:

Номер остановки, Название остановки, Тип остановки, Номер привязанного узла, Количество проходящих маршрутов.

г) Маршруты общественного транспорта. Атрибуты маршрутов:

Номер маршрута, Название маршрута, Название системы транспорта, Состав маршрута, Перевозчик, Длина маршрута, Количество вариантов движения, Количество обслуживающих поездов, Количество обслуживающих остановок.

Данные районирования по транспортным районам и административным районам представлены двумя объектами: районы и примыкания.

д) Районы. Минимальный набор атрибутов:

Номер района, Название района, Тип района, Координата центра X, Координата центра Y, Пассажиропоток из района-источника, Пассажиропоток в район-цель, Площадь района в км<sup>2</sup>, Количество маршрутов по системам транспорта.

е) Примыкания. Минимальный набор атрибутов:

Номер района, номер узла, Длина, Набор разрешенных систем транспорта.

Данные транспортного спроса (перемещениях между транспортными районами) представлены с помощью объекта матрицы корреспонденций со следующим минимальным набором атрибутов:

Количество перемещений, Номер района источника, Номер района цели.

Программное обеспечение осуществляет следующие виды графического анализа исходных данных и результатов расчетов:

- Формирование эпюр для линейных участков транспортной сети с отображением различных свойств объектов.
- Формирование графического отображения матрицы корреспонденций.
- Формирование «тепловых карт» для различных объектов транспортной сети.
- Графический анализ перегруженных участков («узких мест») улично-дорожной сети.
- Визуализация расчетов с помощью 3D диаграмм на модели.

### **2.1.3. Требования к режимам функционирования**

Программное обеспечение представляет собой клиент-серверную систему. Программное обеспечение сохраняет работоспособность и обеспечивает восстановление своих функций при возникновении сбоев в системе электроснабжения аппаратной части, приводящих к перезагрузке ОС.

Программное обеспечение обеспечивает корректную обработку аварийных ситуаций, вызванных неверными действиями пользователей, неверным форматом или недопустимыми значениями входных данных (сообщать пользователю о некорректном формате ввода данных). В указанных случаях система выдает пользователю соответствующие сообщения, после чего возвращается в рабочее состояние, предшествовавшее неверной (недопустимой) команде или некорректному вводу данных.

Программное обеспечение обладает надежностью, обеспечивающей:

- восстановление из резервных копий данных в случае потери оперативных данных;
- контроль целостности данных на уровне СУБД (осуществляется встроенными средствами СУБД, в рамках заложенных в схему БД правил

целостности);

- сохранение целостности данных при нештатных завершениях программного обеспечения (поддерживается с помощью встроенного средства управления транзакциями СУБД);

- сохранение работоспособности программного обеспечения при некорректных действиях пользователя (обеспечивается заложённой в программное обеспечение программной функциональностью, спроектированной с учетом такого рода проблем);

- ведение мониторинга действий пользователя (реализация на уровне БД).

Интерфейс программного обеспечения и руководство пользователя представлены на русском языке.

#### 2.1.4. Опыт внедрения

Программный продукт STSDsysR применялся для создания сценариев развития транспортной системы в городах Пермь, Йошкар-Ола, Улан-Удэ, Соликамск, Курган, Томск, Ижевск, Новый Уренгой, Архангельск, Чита и др. Данные сценарии развития транспортных систем разрабатывались в составе транспортных разделов Генеральных планов, Программ комплексного развития транспортной инфраструктуры, Комплексных схем организации транспортного обслуживания населения общественным транспортом. Теоретические основы и результаты апробации оптимальных транспортных моделей опубликованы в монографии и ряде статей в рецензируемых журналах<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Ю.В. Трофименко, М.Р. Якимов. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов: монография / – М.: Логос, 2013. – 464 с.

Оптимизационные задачи транспортного планирования / М.Р. Якимов // *Транспорт и сервис*. 2014. № 2

Роль городского пассажирского транспорта в повышении качества жизни / М.Р. Якимов // *Соискатель*, приложение к журналу «Мир транспорта», 2015, № 1(9)

Якимов М.Р., Евсеев О.В. Математические модели в формировании эффективных транспортных систем // *Транспорт Российской Федерации*. 2019. № 1 (79). С. 56-60.

Optimal Models used to Provide Urban Transport Systems Efficiency and Safety / M.R. Yakimov // *Transportation Research Procedia*. - 2017. - Vol. 20: 12th International Conference Organization and Traffic Safety Management in large cities, SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016, St. Petersburg, Russia. - P. 702-708 (Scopus)

## **2.2. Инструкция по установке экземпляра программного обеспечения STSDsysR**

### **2.2.1. Минимальные требования к аппаратному обеспечению для работы**

Требования к рабочему месту, на которое предполагается установить программный продукт STSDsysR:

- Процессор Intel Core i5 с тактовой частотой 2,5 ГГц и более;
- ОЗУ – от 8 Гб;
- Доступное место на жестком диске – 2 Гб и более;
- Операционная система – Windows 10, 64-разрядная (x64);
- Устройства взаимодействия с пользователем – клавиатура и мышь.

### **2.2.2. Установка и запуск**

Для установки программного продукта STSDsysR необходимо запустить исполняемый файл Setup.exe и следовать указаниям в диалоговых окнах. В процессе установки необходимо выбрать каталог для установки.

Для запуска установленного программного продукта необходимо зайти в каталог с установленным программным продуктом и запустить исполняемый файл STSDsysR.exe.

## **2.3. Информация о процессах, обеспечивающих поддержание жизненного цикла программного комплекса**

### **2.3.1. Поддержание жизненного цикла программного комплекса**

Поддержание жизненного цикла программного комплекса осуществляется за счёт сопровождения программного комплекса в течение всего периода эксплуатации. Сопровождение программного комплекса также включает проведение модернизации программного комплекса по заявкам пользователей с целью расширения функциональности или исправления ошибок в работе программного комплекса.

Сопровождение программного комплекса необходимо для отсутствия простоя в работе пользователей по причине невозможности функционирования программного комплекса (аварийная ситуация, ошибки в работе программного комплекса), а также обеспечения гарантий корректного функционирования программного комплекса и дальнейшего развития его функциональности.

### **2.3.2. Устранение неисправностей**

Устранение неисправностей, выявленных в ходе эксплуатации программного комплекса, могут быть направлены разработчикам в виде запроса.

В рамках технической поддержки программного комплекса оказываются следующие услуги:

- устранение неисправностей;
- пояснение функционала программного комплекса, помощь в эксплуатации программного продукта.

### **2.3.3. Модернизация программного комплекса**

Модернизация программного комплекса осуществляется путем модификации программного комплекса по заявкам пользователей, с выпуском новых версий программного комплекса, полученных в результате модификации, и предоставления Заказчику неисключительных прав на использование новых версий программного комплекса, полученных в результате модернизации.

## **2.4. Импортирование первичных исходных данных**

По умолчанию программный комплекс STSDsysR для расчетов использует исходные данные, содержащие необходимые параметры для расчета, сохраненные в виде текстовых файлов, расположенных в том же каталоге, в котором установлен STSDsysR. К таким параметрам относятся характеристики улично-дорожной сети, транспортных зон, систем транспорта. Данные, содержащиеся в указанных файлах, можно использовать повторно, при наличии файлов в корневом каталоге установки программы необходимые данные будут считаны автоматически.

Кроме работы с данными, представленными в открытом текстовом формате, возможен прямой импорт данных из программного комплекса PTV Vision VISUM. Для этого необходимо перейти в меню файл – импорт модели PTV Visum. После этого произойдет загрузка необходимых для расчета данных из прогнозной транспортной модели.

## **2.5. Ввод исходных данных, работа с интерфейсом**

Перед расчетом решения оптимизационной модели необходимо проверить и при необходимости отредактировать параметры систем транспорта,



используемых в расчете (рисунки 2.1-2.3). Для этого в окне редактора параметров сети представлено несколько вкладок, соответствующих системам транспорта: пешеходы, общественный транспорт, индивидуальный транспорт.

На рисунке 2.1 представлено окно редактирования для системы транспорта «пешеходы». Основным параметром для системы транспорта «пешеход» является скорость, необходимо ввести значение в км/ч. По умолчанию задано значение скорости пешеходов, равное 4 км/ч. Данный параметр используется при расчете значения целевой функции, а также при расчете ограничений по частоте возникновения ДТП и ущерба от ДТП.

Рис. 2.1. Окно редактирования в программном комплексе STSDsysR параметров для системы транспорта «пешеходы»

На рисунках 2.2-2.3 представлены окна редактирования параметров для систем общественного и индивидуального транспорта.

Основными параметрами для системы транспорта «общественный транспорт» являются:

*Скорость*, км/ч – данный параметр применяется при расчете целевой функции, а также при расчете левой части ограничений по частоте возникновения ДТП и ущерба от ДТП.

*Средняя длина транспортного средства*, м – данный параметр приме-

няется для расчета динамического габарита транспортного средства в составе левой части ограничения по территории.

*Замедление впереди идущего ТС*, м/с<sup>2</sup> – данный параметр применяется для расчета динамического габарита транспортного средства в составе левой части ограничения по территории.

*Ускорение следующего ТС*, м/с<sup>2</sup> – данный параметр применяется для расчета динамического габарита транспортного средства в составе левой части ограничения по территории.

*Вместимость единицы подвижного состава*, чел./ТС – данный параметр применяется для расчета динамического габарита транспортного средства в составе левой части ограничения по территории.

*Расход топлива*, л/100 км – данный параметр применяется для расчета удельного объема энергии, связанной с выбросом CO<sub>2</sub>, в составе левой части экологического ограничения.

*Количество подвижного состава*, ед. – данный параметр используется в составе правой части ограничения по количеству подвижного состава.

*Коэффициент выхода на линию* для общественного транспорта – данный параметр используется в левой части ограничения по количеству подвижного состава.

Перечень необходимых для расчета параметров индивидуально-го транспорта во многом совпадают с параметрами для общественного транспорта. Основными параметрами для системы транспорта «индивидуальный транспорт» являются:

*Скорость*, км/ч – данный параметр применяется при расчете целевой функции, а также при расчете левой части ограничений по частоте возникновения ДТП и ущерба от ДТП.

*Средняя длина транспортного средства*, м – данный параметр применяется для расчета динамического габарита транспортного средства в составе левой части ограничения по территории.

*Замедление впереди идущего ТС*, м/с<sup>2</sup> – данный параметр применяется для расчета динамического габарита транспортного средства в составе левой части ограничения по территории.

*Ускорение следующего ТС*, м/с<sup>2</sup> – данный параметр применяется для расчета динамического габарита транспортного средства в составе левой части ограничения по территории.

*Вместимость единицы подвижного состава*, чел./ТС – данный параметр применяется для расчета динамического габарита транспортного средства в составе левой части ограничения по территории.

*Расход топлива*, л/100 км – данный параметр применяется для расчета удельного объема энергии, связанной с выбросом CO<sub>2</sub>, в составе левой части экологического ограничения.

*Количество подвижного состава*, ед. – данный параметр используется

в правой части ограничения по количеству подвижного состава.

*Коэффициент выхода на линию* для индивидуального транспорта – данный параметр используется в левой части ограничения по количеству подвижного состава.

*Количество поездок на 1 ТС в сутки*, ед. – данный параметр используется в левой части ограничения по количеству подвижного состава.

Редактор параметров сети

Системы транспорта

П (Пешеходы) | **ОТ (Общественный тр-т)** | ИТ (Индивидуальный тр-т) | Новая ИТ+ | Новая ОТ+

Скорость (км/ч)   из модели  редактировать

Средняя длина ТС (м)

Вместимость (чел./ТС)

Расход топлива (л/100км)

Замедление впереди идущего ТС (м/с<sup>2</sup>)

Замедление следующего ТС (м/с<sup>2</sup>)

Энергия на одного (Дж/км)

Доп. параметры

Пассажиры в ТС ОТ за круг (чел)

Кругов на 1 ТС ОТ в сутки

К-т выхода на линию ОТ

Количество подвижного состава ОТ (ед)

Время реакции водителя (с)

Уровень автомобилизации (авт/1000жителей)

Город

Ширина полосы движения (м)

Средняя ширина проезжей части (м)

Длина осей полуэллипса для учета влияния шума (м)

X:

Y:

ДТП

ДТП без пострадавших | Погибших | Раненых

Пешеходы

Пассажиры ОТ

Пассажиры ИТ

Ущерб от ДТП с погибшими, руб

Сохранить параметры

**Рис. 2.2.** Окно редактирования в программном комплексе STSDsysR параметров для системы транспорта «общественный транспорт»

Кроме того, для в нижней части окна редактора параметров семи вводятся общие параметры для всех систем транспорта, такие как:

*Время реакции водителя*, с – задается для всех систем общественного и индивидуального транспорта, данный параметр применяется для расчета динамического габарита транспортного средства в составе левой части ограничения по территории.

*Ширина полосы движения*, м – данный параметр применяется для расчета площади проезжей части в составе правой части ограничения по территории. Дополнительно отметим, что непосредственно для расчета площади проезжей части необходимо еще иметь значение среднего количества полос и протяженности проезжей части всей улично-дорожной сети. Данные параметры рассчитываются автоматически из импортируемого файла

прогнозной транспортной модели или файла shp, содержащего улично-дорожную сеть.

**Рис. 2.3.** Окно редактирования в программном комплексе STSDsysR параметров для системы транспорта «индивидуальный транспорт»

*Длины осей полуэллипса для учета влияния шума, м - параметры для расчета левой части ограничения по шумовому загрязнению.*

Статистика ДТП с разбивкой по тяжести последствий:

*Количество ДТП без пострадавших, в т.ч. с участием пешеходов, пассажиров ОТ, пассажиров ИТ.*

*Количество погибших в ДТП, в т.ч. с участием пешеходов, пассажиров ОТ, пассажиров ИТ.*

*Количество раненых в ДТП, в т.ч. с участием пешеходов, пассажиров ОТ, пассажиров ИТ.*

Данные параметры статистики ДТП применяются для расчета правой части ограничений по частоте ДТП и ущербу от ДТП.

При необходимости возможно создать дополнительные системы транспорта, как индивидуального, так и общественного. Такая опция позволяет, например, оценить влияние на эффективность функционирования транспортной системы электрического транспорта или транспорта разной вместимости.

После ввода или редактирования параметров транспортных систем необходимо нажать кнопку «сохранить параметры».

## 2.6. Запуск процедуры расчета модели и поиска неизвестных

После сохранения параметров появится возможность провести расчет с использованием ранее сохраненных промежуточных результатов, в этом случае значительно сокращается время расчета.

Для использования данной опции необходимо нажать на кнопку «да» в сплывающем при запуске расчета окне (рисунок 2.4). Если расчет значения целевой функции и распределения транспортного спроса для текущей ситуации и оптимального значения целевой функции и распределения транспортного спроса проводится в первый раз, необходимо нажать кнопку «расчет», выполненной в виде черного треугольника ► в левом верхнем углу основного интерфейса.

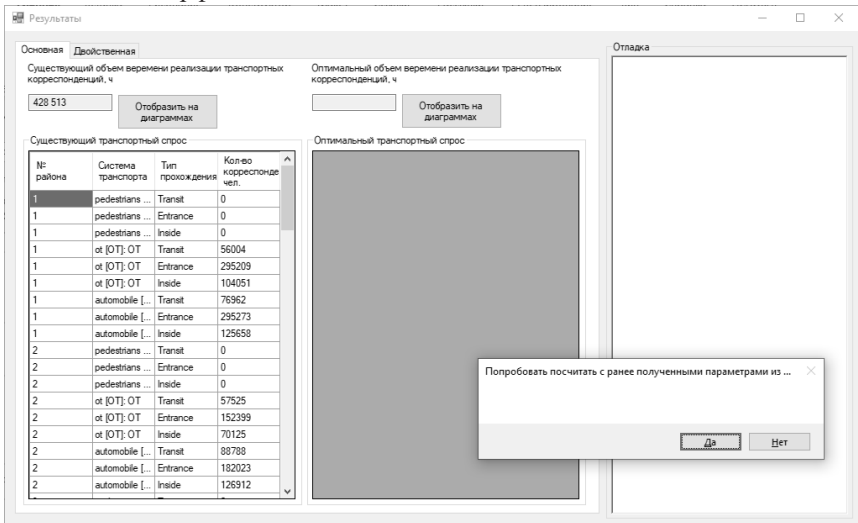


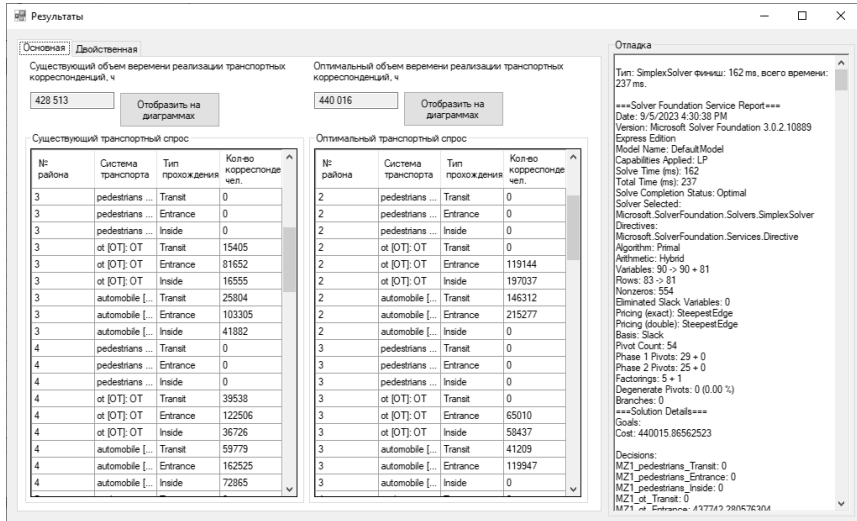
Рис. 2.4. Расчет с использованием ранее сохраненных промежуточных результатов

Если расчет значения целевой функции и распределения транспортного спроса для текущей ситуации и оптимального значения целевой функции и распределения транспортного спроса проводится в первый раз, необходимо нажать кнопку «расчет», выполненной в виде черного треугольника ► в левом верхнем углу основного интерфейса.

## 2.7. Вывод и отображение результатов моделирования

После окончания выполнения расчета выводится окно с результатами расчета (рисунок 2.5). В левой части окна представлены значения целевой

функции и распределение транспортного спроса для существующей ситуации. В правой части окна представлены полученные в результате расчета оптимальные значения целевой функции и распределения транспортного спроса.



**Рис. 2.5.** Окно с результатами расчета значения целевой функции и распределения транспортного спроса для существующей ситуации и полученных в результате расчета оптимальных значений целевой функции и распределения транспортного спроса

Одновременно с расчетом оптимального распределения транспортного спроса проводится расчет двойственной задачи. Результаты расчета двойственных оценок представлены на вкладке «двойственная» в окне с результатами расчета (рисунок 2.6).

Результаты расчета существующего и оптимального транспортного спроса возможно отобразить в виде столбчатых диаграмм. Для этого необходимо в окне с результатами нажать кнопку «отобразить на диаграммах» для существующего (рисунок 2.7) (см. цветную вклейку) или оптимального (рисунок 2.8) (см. цветную вклейку) транспортного спроса.

Для этого необходимо в окне с результатами нажать кнопку «отобразить на диаграммах» для существующего (рисунок 2.7) (см. цветную вклейку) или оптимального (рисунок 2.8) (см. цветную вклейку) транспортного спроса.

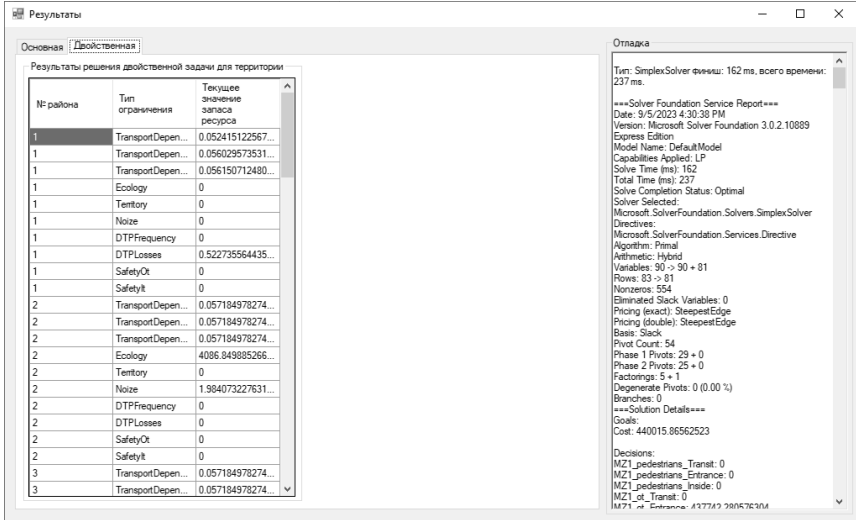


Рис. 2.6. Вкладка с результатами расчета двойственных оценок в окне с результатами расчета

Одновременно с решением оптимизационной задачи решается и связанная с ней двойственная задача распределения имеющихся ресурсов. Результаты решения прямой и двойственной оптимизационной задачи можно анализировать в электронных таблицах MS Excel. В частности, решение двойственной задачи по каждому ресурсу в зависимости от зон удобно анализировать на биржевых диаграммах, часто используемых в электронных таблицах MS Excel (рис. 2.9), (рис. 2.10, см. цветную вклейку).

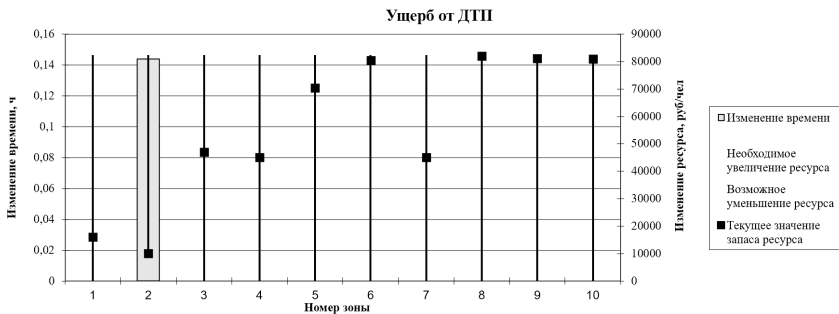


Рис. 2.9. Влияние ограничения по ущербу от ДТП на целевую функцию. Анализ устойчивости решения по ущербу от ДТП

## **Заключение**

Программный продукт STSDsysR представляет собой desktop приложение для персональных компьютеров, который позволяет автоматизировать многие процессы решения классических задач математического программирования применительно к оптимизационной задаче распределения транспортного спроса по территории города.

Программа реализует алгоритм симплекс-метода для поиска экстремума целевой функции минимизации времени реализации транспортных корреспонденций для заданной области исследования. Поиск экстремума функции осуществляется с учетом неухудшения существующих параметров качества жизни населения на исследуемой территории и позволяет найти оптимальные с точки зрения эффективности такой системы варианты ее развития по отдельным территориям исследуемой области при сохранении существующих ресурсных ограничений на параметры качества жизни населения.



## Список литературы

1. Трофименко Ю.В., Якимов М.Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов: монография. – 2-е изд., перераб. и доп. – Пермь: Агентство РАДАР, 2022. – 536 с.
2. Оптимизационные задачи транспортного планирования / М.Р. Якимов // Транспорт и сервис. 2014. № 2
3. Роль городского пассажирского транспорта в повышении качества жизни / М.Р. Якимов // Соискатель, приложение к журналу «Мир транспорта», 2015, № 1(9)
4. Якимов М.Р., Евсеев О.В. Математические модели в формировании эффективных транспортных систем // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 1 (79). С. 56-60.
5. Optimal Models used to Provide Urban Transport Systems Efficiency and Safety / M.R. Yakimov // Transportation Research Procedia. - 2017. - Vol. 20: 12th International Conference Organization and Traffic Safety Management in large cities, SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016, St. Petersburg, Russia. - P. 702-708 (Scopus)
6. Якимов М.Р. Этапы формирования эффективной маршрутной системы городского пассажирского транспорта общего пользования города Дзержинска // Бюллетень транспортной информации. 2020. № 5 (299). С. 11-15.
7. Якимов М.Р. Анализ данных о дневной неравномерности интенсивности транспортных потоков на улично-дорожной сети города Перми // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2020. № 1 (37). С. 5-15.
8. Yakimov M. Methods for assessing road traffic accident risks with changes in transport demand structure in cities // Transportation Research Procedia. — 2020 — Vol. 50. — P. 727-734
9. Yakimov M. R. Features of the Changing Nature of Urban Mobility // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). — Vienna, Austria. – 2020. — pp. 1-7
10. Kurganov, V., Dorofeev, A., Gryaznov, M., Yakimov, M. Process Mining as a Means of Improving the Reliability of Road Freight Transportations // Transportation Research Procedia. – 2021. – 54. – pp. 300–308
11. Yakimov M.R. Solving the problem of finding the locally optimal placement of corridors for the possible movement of transport of large carrying capacity // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO. — 2021 — Conference Proceedings.
12. Yakimov M.R. Methodology for substantiating the indicators of economic entities to solve the problems of determining their reliability and stability in the organizational network // Aip conference proceedings. scientific conference on railway transport and engineering (RTE 2021). — 2021 — Conference

Proceedings.

13. Якимов М.Р. Подходы к формированию эффективной маршрутной сети крупных городов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (55). С. 107-113.

14. Якимов М.Р. Транспортное планирование: терминологический словарь. – М: Агентство РАДАР, 2022. – 86 с.

**Руководство пользователя  
программного обеспечения в области транспортного  
планирования и моделирования STSDsysR**

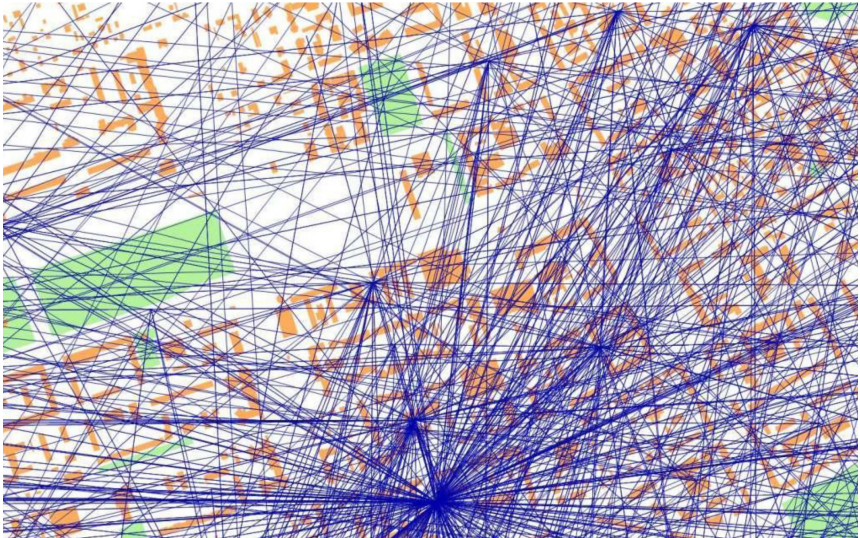
Редактор А.С. Нестерова  
Корректор А.Ю. Любимова  
Компьютерная верстка М.Л. Белуш

Подписано в печать 29.08.2023.  
Формат 60×90 1/16. Печать цифровая.  
Тираж 300 экз. Заказ № 2

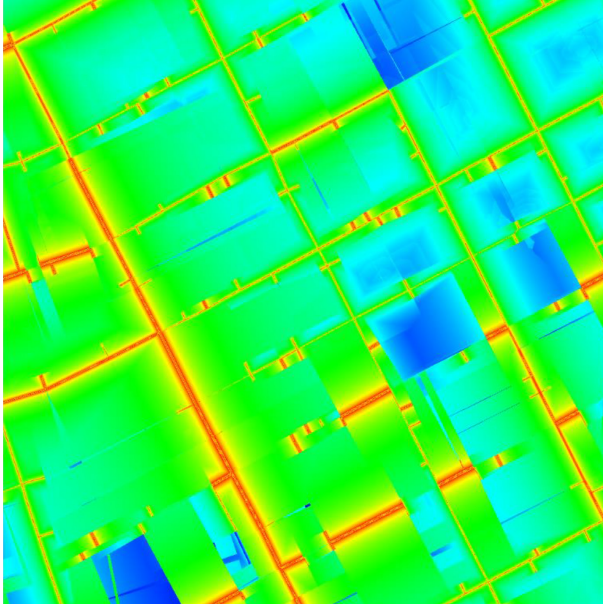
Издательство Агентство РАДАР  
ООО «Агентство дорожной информации РАДАР»  
E-mail: road-auto@mail.ru



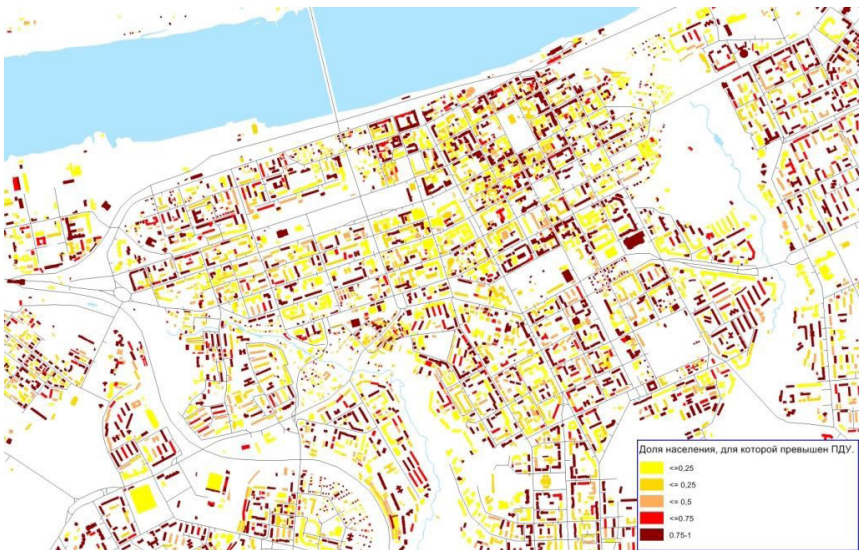
**Рис. 1.12.** Пример реальной сети на плане города (к стр. 44)



**Рис. 1.13.** Пример идеальной сети (к стр. 44)



**Рис. 1.16.** Фрагмент поля уровней транспортного шума для центральной части территории города (к стр. 53)



**Рис. 1.19.** Картограмма доли населения, попадающего в зону превышения ПДУ транспортного шума (к стр. 56)



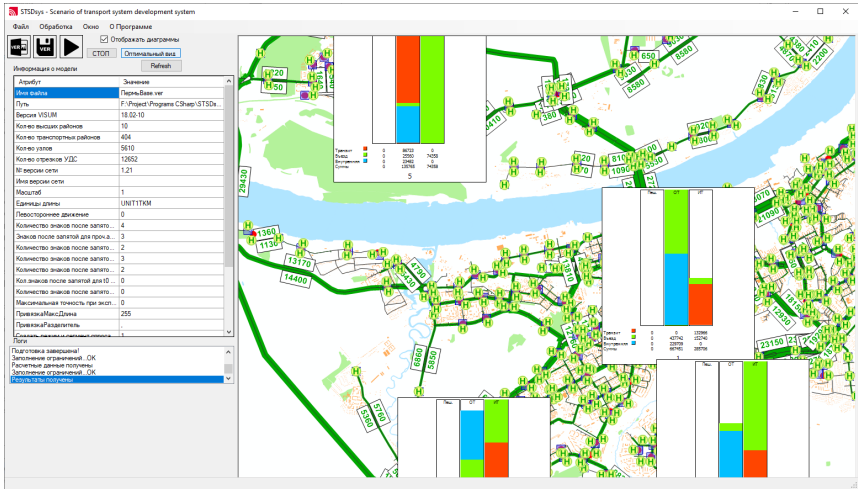


Рис. 2.8. Отображение на диаграммах оптимального распределения транспортного спроса (к стр. 101)

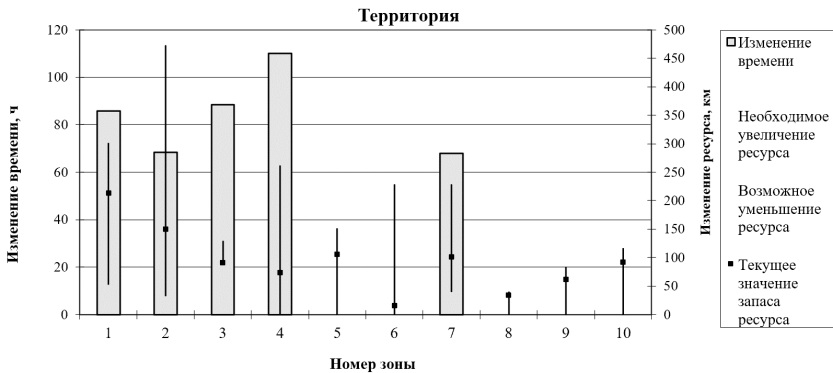


Рис. 2.10. Влияние ограничения по УДС на целевую функцию. Анализ устойчивости решения по ограничениям УДС (к стр. 102)



Агентство РАДАР  
E-mail: road-auto@mail.ru



ISBN 978-5-6048401-3-9



9 785604 840139