

М.Р. Якимов

**ТРАНСПОРТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ:
СОЗДАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ МОДЕЛЕЙ ГОРОДОВ**



Москва • Логос • 2013

УДК 654.1/5(470.53-25)

ББК 39.11

Я45

Р е ц е н з е н т ы:

Е.А. Нурминский, профессор кафедры математических методов
в экономике Института математики и компьютерных наук

Дальневосточного федерального университета, д.ф.-м.н.,

О.Н. Ларин, заведующий кафедрой «Эксплуатация автомобильного
транспорта» Южно-Уральского государственного университета, д.т.н.

Я45 Якимов М.Р.

Транспортное планирование: создание транспортных
моделей городов: монография / М.Р. Якимов. – М.: Логос,
2013. – 188 с.

ISBN 978-5-98704-729-3

В монографии последовательно рассмотрены все этапы создания и функционирования прогнозной транспортной модели города. Каждый шаг создания модели представлен как часть общей структурной схемы ее работы, представленной в виде связи исходных данных и набора определяющих соотношений. Подробно рассмотрены особенности построения модели транспортного спроса и транспортного предложения. Особое внимание уделено методам и технологиям калибровки транспортной модели. Приведены основные оценочные параметры качества транспортных моделей и способы их получения.

Книга предназначена для специалистов в области транспортного планирования, моделирования и организации движения, проектировщиков, студентов, аспирантов и преподавателей транспортных вузов и специальностей. Положения книги реализованы в процессе построения и работы транспортных моделей ряда российских городов и регионов.

УДК 654.1/5(470.53-25)

ББК 39.11

ISBN 978-5-98704-729-3

© Якимов М.Р., 2013

© Логос, 2013

Содержание

Предисловие.....	7
Введение	10

Раздел 1. ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ПРОГНОЗНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МОДЕЛЕЙ ГОРОДОВ

1.1. Теоретико-прикладные основы транспортного моделирования.....	13
1.2. Мировой опыт создания прогнозных моделей. Современные инструменты моделирования	17
1.3. Структурная схема прогнозной транспортной модели.....	24

Раздел 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОГНОЗНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МОДЕЛЕЙ

2.1. Исходные данные для создания модели транспортного спроса	31
2.1.1. Исходные статистические данные. Источники и методики расчета.....	31
2.1.1.1. Население и трудящееся население	31
2.1.1.2. Рабочие места	32
2.1.1.3. Рабочие места в сфере услуг	32
2.1.1.4. Количество студентов и учебных мест.....	36
2.1.1.5. Количество школьников и учебных мест в школах.....	44
2.1.2. Исходные данные функционирования транспортной системы. Методики сбора данных.....	49
2.1.2.1. Сбор исходных данных об интенсивности транспортных потоков	49
2.1.2.2. Сбор данных о пассажирских потоках	70
2.1.3. Исходные данные о транспортной подвижности населения	75

2.2. Исходные данные для создания модели транспортного предложения.....	78
2.2.1. Исходные данные для создания модели транспортного предложения индивидуального транспорта.....	78
2.2.1.1. Создание геометрии улично-дорожной сети	78
2.2.1.2. Исходные данные о существующей организации дорожного движения	80
2.2.2. Исходные данные для создания модели транспортного предложения общественного транспорта.....	82

Раздел 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОГО СПРОСА.....

3.1. Расчет транспортного спроса	87
3.1.1. Генерация транспортного спроса. Сегменты и слои транспортного спроса	87
3.1.2. Распределение транспортного спроса.....	90
3.1.3. Выбор режима	99
3.1.4. Перераспределение транспортного спроса	102
3.1.4.1. Перераспределение индивидуального транспорта	102
3.1.4.2. Перераспределение общественного транспорта	106
3.2. Модели транспортной подвижности населения. Определение объема внешних трудовых корреспонденций.....	108
3.2.1. Определение среднегодовых объемов внешних трудовых корреспонденций по натурным данным	108
3.2.2. Восстановление матрицы корреспонденций для внешних трудовых корреспонденций	111

Раздел 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ.....

4.1. Состав транспортного предложения.....	112
4.1.1. Транспортное предложение индивидуального транспорта	112
4.1.2. Транспортное предложение общественного транспорта..	114
4.2. Транспортное предложение на различных этапах расчета прогнозной транспортной модели.....	117
4.2.1. Транспортное предложение на этапе распределения и выбора режима	117
4.2.1.1. Индивидуальный транспорт	117
4.2.1.2. Общественный транспорт	118
4.2.1.3. Использование матриц затрат	118
4.2.2. Транспортное предложение на этапе перераспределения	119
4.2.2.1. Индивидуальный транспорт	119

4.2.2.2. Общественный транспорт.....	123
Раздел 5. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВОГО ТРАНСПОРТА.....	124
Раздел 6. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ПИКОВОЙ ЗАГРУЗКИ	127
Раздел 7. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ТРАНСПОРТНЫХ МОДЕЛЕЙ.....	130
Раздел 8. МЕТОДЫ ВЕРИФИКАЦИИ И КАЛИБРОВКИ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ	132
8.1. Этапы и последовательность калибровки транспортной модели города	132
8.2. Верификация и калибровка транспортного спроса.....	137
8.3. Верификация и калибровка транспортного предложения	142
8.3.1. Задание максимальной натурной пропускной способности перегонов.....	142
8.3.2. Калибровка модели индивидуального транспорта	144
8.3.3. Калибровка модели общественного транспорта	144
Раздел 9. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ	146
Раздел 10. ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ	151
Раздел 11. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНЫХ МОДЕЛЕЙ	159
11.1. Взаимодействие разных видов транспортных моделей.....	160
11.2. Взаимодействие прогнозных транспортных моделей и интеллектуальных транспортных систем (ИТС)	161
ПРИЛОЖЕНИЯ	163

Приложение 1. Методика сбора данных о суточной интенсивности транспортных и пешеходных потоков	165
Приложение 2. Методика сбора данных о пассажирообороте на остановочных пунктах городского пассажирского транспорта общего пользования	172
Приложение 3. Методические указания по сбору данных о работе светофорных объектов	175
Заключение	184
Список литературы.....	185

Предисловие

Россия отстает от Европы в развитии как автомобилизации городов, так и транспортного моделирования. Необходимость в построении масштабных транспортных моделей российских городов еще не приобрела достаточную остроту.

В первую очередь это можно связать с фундаментальными проблемами формирования системы управления транспортными системами российских городов¹. Реформы государственного и муниципального управления в меньшей степени затронули вопросы управления городским хозяйством и транспортной системой города в частности.

Цель функционирования городских транспортных систем еще больше скрылась за сложными экономическими взаимоотношениями в растущей рыночной экономике. Именно экономическая целесообразность диктует сегодня основные условия развития транспортных систем.

Задачи развития транспортных систем ставятся «по умолчанию», и принятие конкретных управленческих решений основывается только лишь на возможностях бюджетов соответствующих уровней на данный момент времени. В таких условиях ценность использования математического моделирования в задачах транспортного планирования сводится к минимуму.

На современном этапе представляется интересным разработать единую пошаговую методику создания транспортных моделей городов, в частности – прогнозных моделей. Эта задача будет включать в себе как систематизацию существующего мирового опыта транспортного моделирования, уже воплощенного в конкретных прикладных программах, так и обобщение различных подходов к реализации каждого из шагов создания четырехшаговых транспортных моделей городов.

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

Стоит отметить, что и сам термин «транспортная модель» нуждается в серьезной формализации. В современном научном и инженерном сообществе не существует четкого понимания, что же следует называть «транспортной моделью». Взгляды на этот вопрос инженеров, проектировщиков, чиновников и ученых существенно разнятся. Различны они и в среде ученых. Каждое из этих сообществ имеет свои ожидания, свои требования и соответственно свое видение и понимание того, что же следует называть транспортной моделью.

Написание этой книги стало попыткой автора систематизировать все то, что так или иначе касалось вопросов транспортного моделирования в его прикладных исследованиях по формированию эффективных транспортных систем городов и регионов. Достаточно много внимания пришлось уделить понятию «транспортная модель» и ее составляющим, классификации видов транспортных моделей и областей их применения.

Все же основное внимание в книге уделено прогнозным транспортным моделям. Именно этот класс моделей, по мнению автора, наиболее близок к понятиям «транспортное моделирование» и «транспортное планирование». Созданию прогнозных транспортных моделей посвящена основная часть книги. Подробно изложены все этапы как создания, так и работы прогнозных транспортных моделей.

Интерес также представляет предложенная структурная схема работы транспортной модели: в одном месте можно видеть как блок-схему работы всего алгоритма прогнозирования, так и основные определяющие соотношения, используемые на каждом этапе расчета, а также необходимые исходные данные. Именно разработка такой схемы стала поводом к написанию всей книги, в которой автор попытался представить читателю транспортную модель как единый «организм» на протяжении всех этапов его жизни.

Многие положения книги проиллюстрированы примерами создания и работы классической четырехшаговой транспортной модели крупного города. В качестве инструмента для такой иллюстрации выбран программный комплекс PTV Vision ®VISUM компании PTV AG. Для владельцев и пользователей программного комплекса PTV Vision ®VISUM книга будет представлять несомненный практический интерес как некое руководство по созданию транспортных моделей в данном программном продукте, в первую очередь – транспортных моделей крупных городов.

Вопросы последующей эксплуатации, совершенствования и применения прогнозных транспортных моделей стоят не менее остро, чем вопросы их создания. В этом разрезе кроме организационно-технических мероприятий требуют решения задачи совершенствования систем управления развитием дорожно-транспортного комплекса города, совершенствования законодательной и нормативной основ

осуществления такого управления, в первую очередь – основанных на применении современных средств поддержки выработки и выбора управленческих решений, к которым относится и транспортное моделирование.

Стратегиям управления развитием транспортных систем городов будут посвящены отдельные книги серии «ТРАНСПОРТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ».

Автор выражает благодарность сотрудникам Центра дорожной информации Галине Николаевне Быданцевой и Юрию Александровичу Попову за помощь в подготовке этого издания.

Также автор будет благодарен за отзывы и пожелания по содержанию научной монографии, которые просит направлять по электронной почте: auto@perm.ru.

Введение

В системе обобщенных затрат (времени и денег) качество и назначение транспортных систем целесообразно рассматривать с двух точек зрения. В соответствии с этим транспортные системы должны нести следующие функции:

- обеспечение транспортной доступности¹;
- снижение транспортных издержек².

Транспортная доступность – это возможность удаленного использования («потребления») территории с целью обеспечения физиологических, экзистенциальных и духовных потребностей людей.

Транспортные издержки – это плата за возможность получать качественную информацию, т.е. удовлетворение духовных потребностей людей. Человек готов платить за такую возможность деньгами и своим временем. Задачи обеспечения транспортной доступности решались одновременно с этапом пионерского освоения территорий, а этот этап был закончен на планете к началу XX в.

Интересно, что задачи обеспечения транспортной доступности и снижение транспортных издержек практически во всем мире (в большинстве стран) обычно возникали и решались последовательно. И только в нашей стране, в силу существенной неравномерности распределения плотности населения, задача снижения транспортных издержек (преимущественно в городах) появилась задолго до решения проблемы обеспечения транспортной доступности, в том числе и заселенных территорий. И сейчас эти две проблемы существуют в России одновременно.

Рост транспортных издержек городского сообщества и нерешенность задач обеспечения транспортной доступности значительной ча-

¹ Транспортная доступность – мера способности территории быть достигнутой или достигать другие территории при помощи транспорта.

² Транспортные издержки – денежно-кредитная мера того, сколько должен заплатить транспортный потребитель, чтобы реализовать транспортную потребность.

сти населения затрудняет нахождение в обществе согласия в вопросах стимулирования либо сдерживания автомобилизации населения. Уже растут издержки общества от автомобилизации, и по-прежнему для значительной части населения страны обладание личным автомобилем – это заветная цель.

Представляется, что и вопросы математического моделирования транспортных систем следует рассматривать также в разрезе основных функций транспортных систем.

В обоих случаях объектом исследования является транспортная система (транспортная система страны, региона и города), а вот предметом исследования будут две стороны функционирования транспортных систем с точки зрения возможности удовлетворять различные потребности современного человека – физиологические либо духовные³.

В таком случае при моделировании транспортной доступности объектом исследования будет транспортная система страны и регионов. *Предмет исследования* – влияние транспортной системы региона на удовлетворение физиологических потребностей людей. *Целевая функция* – повышение благосостояния жителей. *Критерий транспортной доступности* – увеличение налогооблагаемой базы региона за счет освоения природных богатств и роста промышленного производства. *Способ обеспечения транспортной доступности* – «соединение» при помощи транспорта предметов производства, средств производства, производительных сил и потребителей.

Для исследований также используется математическое моделирование. Создаваемые транспортные модели можно назвать экономическими. При этом степенями свободы в таком моделировании будут различные системы транспорта, а также различная территория. Именно использование (потребление) территории будет целью такого моделирования.

В решении задач снижения транспортных издержек объектами исследования обычно являются транспортные системы городов. *Предмет исследования* – влияние транспортной системы города на удовлетворение духовных потребностей людей. *Целевая функция* – снижение времени реализации транспортных корреспонденций. *Критерий транспортных издержек* – время. *Способ снижения транспортных издержек* – сбалансированное использование ресурсов общества: бюджета, территории общего пользования (в том числе под применение различных систем транспорта).

Для решения этих задач используются разные виды транспортных моделей – оптимальные (предпрогнозные), прогнозные, имитационные. Степенями свободы при таком моделировании также являются

³ Maslow A. Motivation and personality. Rev. ed. New York: Harper and Row. 1970.

системы транспорта и территория, однако в этом случае территория будет выступать в качестве ограничения.

Далее в этой книге внимание будет уделено только моделям, призванным решать задачи снижения транспортных издержек, – это прогнозные транспортные модели крупных городов. При анализе эффективности 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 возможности развития территории и, в конечном итоге, качество жизни на ней. Транспортное движение на городской территории как ничто другое иллюстрирует тот факт, что потребности в моторизованном движении никогда не могут быть удовлетворены полностью.

Дилемма, которая стоит перед городским сообществом, заключается в том, что, с одной стороны, необходимо сдерживание использования автомобилей в ограниченном пространстве центров городов, но с другой – стимулирование максимального использования автомобилей с целью достижения максимальной мобильности населения на тех территориях, где это возможно.

Представляется, что сбалансированное городское развитие с высоким уровнем качества жизни граждан может быть достигнуто только при наличии интегрированной мультимодальной транспортной системы, где каждый вид транспорта действует в своей нише наиболее эффективного функционирования при координированном их использовании.

Из-за сложности процессов функционирования транспортных систем крупных городов до настоящего времени преобладают качественные (экспертные) оценки изменения их эффективности при реализации тех или иных мероприятий.

Отсутствие системы координат, ограничений, показателей (критериев) оценки эффективности функционирования транспортных систем городов, учитывающих их мультимодальность, объясняется отсутствием адекватных методов количественной оценки спроса на услуги транспорта. При наличии транспортной модели становится возможным проведение исследований по сопоставлению эффекта от функционирования транспортной системы и затрат на это функционирование, а также потребностей общества и степени их удовлетворения.

Раздел 1

Основы создания прогнозных транспортных моделей городов

1.1. Теоретико-прикладные основы транспортного моделирования

Известно, что слово «модель» происходит от латинского *Modulus* – мерка и означает:

1. Миниатюрная копия предмета;
2. Образец какого-либо предмета;
3. Тип, марка изделия;
4. Чертеж или образец, наглядно демонстрирующий строение и действие какого-либо объекта или процесса и т.д. [1].

В процессе исследований модель – это отображение, аналог явления или процесса в основных, существенных для целей исследования чертах. Процесс создания модели называется моделированием. Модель должна так учитывать все взаимосвязи, закономерности и условия, чтобы на ее основе можно было выполнить эксперименты, цель которых – определение «поведения» объекта моделирования в различных возможных (часто наблюдаемых в действительности) условиях [2].

Любые модели только отчасти воспроизводят объект исследования или какое-либо явление (процесс). Модель, например, физическая или геометрическая, полностью воспроизводящая свойства моделируемого объекта, называлась бы тогда копией моделируемого объекта.

Модель – это специально создаваемый искусственный объект, на котором воспроизводятся вполне определенные характеристики исследуемого объекта с целью его изучения, а **моделирование** – вполне определенное конкретное отображение рассматриваемых характери-

стик изучаемого объекта в целях его исследования. Построение модели часто продиктовано экономической целесообразностью, т.е. попыткой получить максимально полное представление об объекте или процессе, не создавая его в натуре.

Моделирование является важным инструментом научной абстракции, позволяющим выделить и проанализировать существенные для исследования свойства, взаимосвязи, структурные, функциональные параметры.

По самой своей природе математические методы могут применяться не непосредственно к изучаемой действительности, а лишь к математическим моделям того или иного круга явлений или проблем [3, 4]. Математическое моделирование является наиболее совершенным и вместе с тем наиболее эффективным методом моделирования. Именно этот путь моделирования открывает возможности для применения средств математического анализа.

Естественно, результаты исследования модели будут иметь практический интерес, если сама модель достаточно адекватна рассматриваемому явлению, то есть достаточно хорошо отображает реальную ситуацию.

Для более точного описания действительности приходится строить несколько моделей, учитывающих различные стороны рассматриваемого явления, т.е. порой целесообразнее построить несколько моделей одного и того же объекта или явления, чем пытаться построить одну, наиболее полно описывающую этот процесс модель.

В дальнейшем на этапе поиска алгоритма решения модели такой подход вдвойне оправдан.

Степень совершенства математических моделей, применяемых в той или иной науке, математический аппарат, используемый для их исследования, в известной мере характеризуют уровень развития науки.

Адекватность модели является в какой-то мере условным понятием, т.к. полного соответствия модели реальному объекту быть не может. Чаще имеется в виду не просто адекватность, а только лишь соответствие модели оригиналу по тем свойствам, которые считаются существенными для исследования рассматриваемого явления.

Главная задача всех математических моделей – заглянуть в будущее. Заглянуть в то время, когда моделируемого объекта еще нет, либо создать условия, в которых этот объект еще не был.

Среди всего разнообразия математических моделей, практически применяемых на сегодняшний день для анализа транспортных сетей городов и регионов, можно выделить три основные группы моделей:

- 1) прогнозные;
- 2) имитационные;
- 3) оптимизационные модели.

В свою очередь каждой группе моделей можно поставить в соответствие определенный круг решаемых задач. В нашем случае это будут задачи:

- транспортного планирования;
- организации дорожного движения;
- оптимизации перевозочного процесса.

Также каждая группа имеет свой объект исследования и соответствующий этому объекту набор степеней свободы. Соответственно, в этом случае в качестве таких объектов будут выступать:

- транспортный поток;
- транспортное средство;
- пассажиропоток;
- формализованный параметр оптимизации (цель).

Моделирование дает возможность наглядно изобразить комплексные процессы деятельности транспорта, прогнозировать перераспределение транспортных потоков в результате внешних воздействий на участки улично- дорожной сети (УДС), таких как:

- строительство новых участков сети;
- реконструкция (расширение) участков сети;
- закрытие отдельных участков сети;
- изменения условий движения в сети;
- изменение маршрутной сети и расписаний движения общественного транспорта (ОТ).

Прогнозные модели предназначены для моделирования объемов транспортной работы в сетях при известном размещении потокообразующих объектов города. При помощи прогнозных моделей можно прогнозировать последствия изменений в транспортной сети города, происходящие либо в процессе изменения транспортного спроса, либо в процессе изменения транспортного предложения. Модели этого типа применяются для поддержки решений в области транспортного планирования города, для анализа последствий тех или иных альтернативных проектов развития транспортной сети и др.

Прогнозные модели в свою очередь можно разделить также на две группы по основным задачам прогнозирования:

- прогнозирование во времени;
- прогнозирование в пространстве.

Группы моделей подчиненно связаны друг с другом. Прогнозы интенсивности движения транспорта являются исходными данными для последующей имитации этого движения во времени. Имитация, в свою очередь, порождает видимую потребность в оптимизации того или иного транспортного процесса. Такая связь моделей различных групп и назначений позволяет говорить о некоторой модельной основе, так или иначе необходимой при создании каждой из них и объединяющей их одним термином – транспортная модель города.

Прогнозные и имитационные модели в своих алгоритмах уже учитывают основные определяющие предпочтения всех участников дорожного движения при выборе маршрутов движения по сети. Задача прогноза загрузки транспортной сети обычно состоит в расчете усредненных характеристик движения, таких как объемы межрайонных передвижений, интенсивность 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. При этом усредненные параметры транспортных потоков и их распределение по различным путям движения считаются известными и служат исходными данными для этих моделей.

Таким образом, прогноз интенсивности 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. Применение таких моделей целесообразно при разработке проектов организации дорожного движения, оптимизации светофорных циклов регулирования и т.п.

Решая задачу совершенствования организации дорожного движения в отдельном элементе улично-дорожной сети города, нельзя ориентироваться только на существующие объемы движения в этом элементе. Изменения в транспортном предложении неминуемо повлекут изменение спроса на этот участок сети у других участников дорожного движения. Для решения задачи организации дорожного движения на отдельном элементе или узле может быть использована имитационная модель.

С другой стороны, улучшение условий проезда по данному участку может привести к тому, что большее количество водителей будет выбирать маршруты проезда с использованием этой улицы. Это, в свою очередь, приведет к ослаблению нагрузки на другие участки сети и к дальнейшему перераспределению потоков.

Таким образом, возникает задача получения нового прогноза распределения транспортных потоков по городу, которое установится после проведения данного мероприятия. И эта задача реализуется уже при помощи прогнозных моделей. А далее новое распределение транспортного движения по сети и изменившиеся нагрузки и объемы движения на этом конкретном участке также потребуют корректировок организации дорожного движения, настройки работы светофорных объектов. И такая последовательность операций может повторяться бесконечно.

В предлагаемой книге особое внимание уделяется последовательному разбору создания и принципам функционирования прогнозных транспортных моделей на отдельных шагах и стадиях. Все этапы соз-

дания и последующие шаги по верификации и оценке качества функционирования транспортной модели будут рассмотрены на примере транспортной модели города Перми.

Транспортная модель города Перми была создана автором в 2008 г. Накопленный за это время опыт разработки модели и последующей ее актуализации и калибровки позволил сформировать стройную и последовательную стратегию создания подобных моделей, которая представляет самостоятельную научную ценность.

1.2. Мировой опыт создания прогнозных моделей. Современные инструменты моделирования

Сложившийся подход к решению задач транспортного планирования и организации дорожного движения обычно заключается в создании программ мониторинга состояния и условий движения на улично-дорожной сети городов. В дальнейшем на основе данных мониторинга строятся статистические модели, описывающие изменение состояния транспортной системы во времени и влияние транспортной системы на состояние жизни в городах. На основе этих моделей делаются попытки прогнозирования поведения транспортной системы во времени. Но огромное число факторов помимо основных – интенсивности и скорости транспортных потоков – делает эту задачу почти невыполнимой.

Для построения некой стационарной усредненной модели поведения и функционирования УДС города требуются значительные по времени наблюдения за состоянием движения. После чего можно описать это поведение математически и постараться учесть максимальное количество факторов, влияющих на это поведение. Но жизнеспособность таких моделей во времени ничтожна. С таким трудом построенная модель работы городской транспортной системы города полностью разрушается при сколь угодно малом изменении транспортного предложения в системе. Например, организации движения или строительстве новых элементов сети.

Движение транспортных потоков, описываемое рядом сравнительно легко получаемых параметров этого движения, само по себе не несет практически никакой информации для целей последующего моделирования этих процессов. Возникает вопрос о целях моделирования.

Значимость модели можно оценить только прикладным характером такого инструмента, как модель. Построив модели поведения производных величин, мы не получим инструмент для реализации управленческих решений по воздействию на систему в целом, не зная

первообразной, причин и внутренних законов функционирования системы.

Главная задача всех математических моделей – заглянуть в будущее, в то время, когда моделируемого объекта еще нет, либо создать условия, в которых этот объект еще не был.

Как уже было упомянуто выше, можно выделить три основные группы транспортных моделей: прогнозные модели, имитационные модели, оптимизационные модели.

И каждой группе моделей можно поставить в соответствие определенный круг решаемых задач. В нашем случае это будут задачи: транспортного планирования, организации дорожного движения, оптимизации перевозочного процесса.

Моделирование дает возможность наглядно отобразить комплексные процессы деятельности транспорта, прогнозировать перераспределение транспортных потоков в результате внешних воздействий на участки УДС, таких как: строительство новых участков сети, реконструкция (расширение) участков сети, закрытие отдельных участков сети, изменения условий движения в сети.

Основываясь на результатах наблюдений за действующей УДС, можно выявить только несбалансированность сети и устранить эту несбалансированность, при этом уделяя внимание не узким (проблемным) местам, а исключительно поискам резервов и разработке мероприятий по их задействованию, что чаще всего решается средствами организации дорожного движения.

Отсюда следует вывод: слабое место на УДС – это тот ее участок, где есть резервы в использовании пропускной способности, а следовательно, риски в дорожном планировании (проектировании и строительстве) в первую очередь связаны с недополученной транспортной работой при реализации дорожного проекта.

И эта ошибка в принятии решений почти всегда является неустрашимой, в отличие от проектов, в результате реализации которых достигается большая транспортная работа даже при значительных транспортных издержках.

Прогнозные модели предназначены для моделирования объемов транспортной работы в сетях при известном размещении потокообразующих объектов города.

При помощи этих моделей можно прогнозировать последствия изменений в транспортной сети города. Модели этого типа применяются для поддержки решений в области транспортного планирования города, для анализа последствий тех или иных мер по организации движения, при выборе альтернативных проектов развития транспортной сети и др.

Транспортные модели, основанные на принципах компьютерного моделирования распределения транспортных потоков, впервые соз-

даны в 1960 г. в Великобритании. Постепенно транспортные модели становятся востребованными и в российских городах.

В настоящее время в России сформировалось более десяти коллективов, которые с успехом используют отечественные и зарубежные пакеты прикладных программ для решения статических и динамических задач транспортного планирования и организации дорожного движения в городах.

Большинство исследователей решает частные, локальные задачи на отдельных участках УДС, и лишь немногие задумываются об оценке эффективности транспортной системы в целом, влияющей на качество жизни, с учетом эволюции транспортной системы. Такие исследования очень важны не столько для решения текущих проблем по борьбе с транспортными заторами, сколько для выработки научно обоснованной стратегии развития транспортных систем городов на перспективу с учетом изменения транспортной мотивации людей под влиянием различных факторов, прежде всего связанных с изменением их потребностей.

Современные транспортные модели и сейчас используют основные определяющие соотношения поведения людей в процессе удовлетворения их транспортных потребностей, выведенные во второй половине XX в. Однако бурное развитие вычислительных мощностей современных компьютеров позволило за последние 20 лет в десятки раз ускорить основные вычислительные процедуры, существенно уточнить и детализировать модели транспортных сетей городов, учесть в расчетах гораздо большее количество различных факторов, определяющих поведение современных участников дорожного движения.

К настоящему времени созданы транспортные модели всех крупных городов мира. В США созданы модели всех городов с населением более 1 млн. жителей. В Германии и Нидерландах свои транспортные модели имеет каждый город с населением более 100 тыс. человек.

С помощью коммерческих программных комплексов построены транспортные модели в таких городах, как Нью-Йорк, Лос-Анджелес, Лондон, Париж, Милан и другие. Построена модель транспортной сети почти всей Европы от границ СНГ до Атлантического океана (рис. 1.1).

Самой подробной (с наибольшим количеством элементов) транспортной моделью в мире является транспортная модель Германии (рис. 1.2), выполненная в PTV Vision® VISUM. Кроме того, разработана транспортная модель Швейцарии (рис. 1.3), включающая также соседние страны Европы в качестве внешних районов.

За последние годы несколько российских городов закончили создание своих транспортных моделей и уже успешно их эксплуатируют



Рис. 1.1. Фрагменты транспортных моделей Европы, городов Лос-Анджелес (США) и Карлсруэ (Германия)



Рис. 1.2. Транспортная модель Германии

(рис. 1.4 и 1.5). Среди этих городов Москва, Санкт-Петербург, Пермь, Самара, Томск, Астрахань, Барнаул, Вологда.

Найденные еще в прошлом веке закономерности перераспределения транспортных потоков по улично-дорожной сети городов в настоящее время достаточно подробно алгоритмизированы, запрограммированы и превращены в коммерческие программные продукты.

Все созданные программные продукты, как и сами транспортные модели, можно разделить по назначению и типу решаемых задач на несколько классов. Однако производители программных продуктов в области транспортного моделирования и прогнозирования в условиях жесткой конкуренции на рынках программного обеспечения стремятся унифицировать свои продукты, создавая целые программные комплексы, охватывающие решение задач различного назначения и использующие транспортные модели разных классов.

Чаще в единые программные комплексы объединяются инструменты, реализующие задачи и работающие с моделями первого и второго класса, т.е. в области транспортного планирования и организации до-

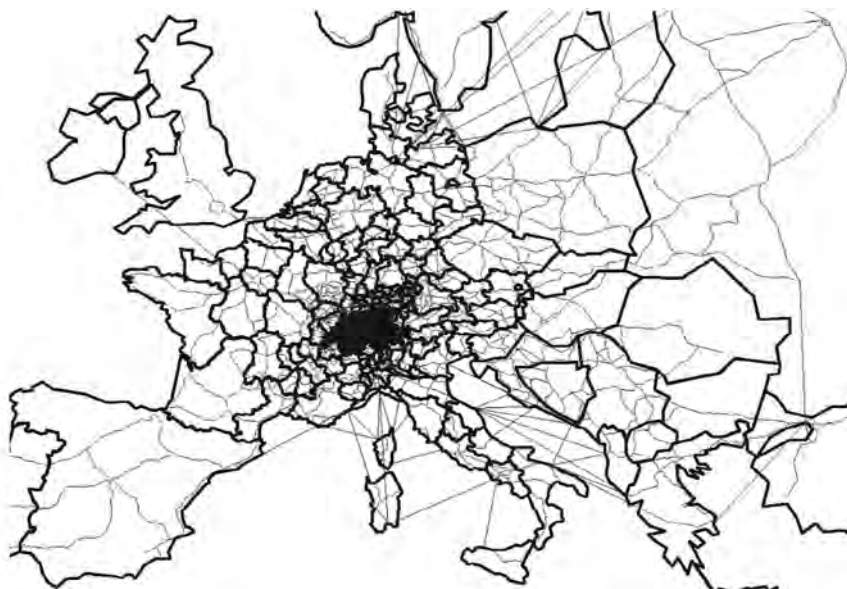


Рис. 1.3. Транспортная модель Швейцарии



Рис. 1.4. Транспортные модели Санкт-Петербурга и г.о. Самара

рожного движения. Для простоты восприятия назначения отдельных модулей программных комплексов производители используют классификацию, определяющую степень детализации модели и геометрические размеры моделируемых систем.

Различают программные продукты макро- и микро- уровня моделирования.

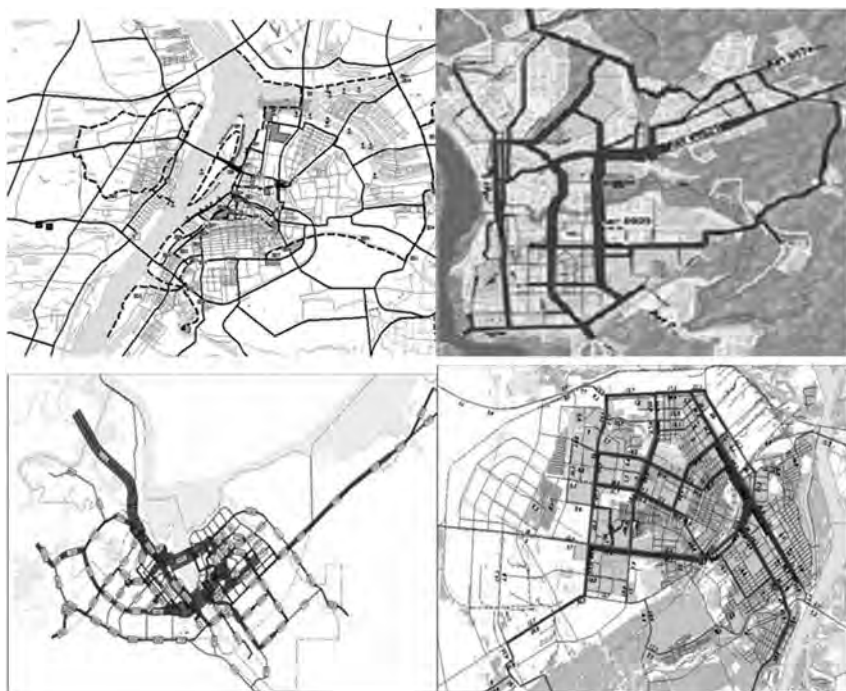


Рис. 1.5. Транспортные модели российских городов: Астрахань, Томск, Барнаул, Вологда

В настоящий момент в мире только формируется рынок программных продуктов в области транспортного планирования (макро-моделирования) и организации движения (микро-моделирования). Одной из первых и наиболее известной в прошлом программ, реализующих четырехшаговую процедуру прогнозирования загрузки транспортных сетей, была программа ЕММЕ/2. Аббревиатура ЕММЕ/2 расшифровывается как «Equilibre Multimodal, Multimodal Equilibrium», что означает «Мультимодальное Равновесие».

Впервые транспортные модели в ЕММЕ/2 созданы в Канаде и в Финляндии. ЕММЕ/2 была разработана как интерактивно-графическая гибкая среда моделирования для городского и регионального транспортного планирования. Успешным результатом построения мультимодальной транспортной модели для большого города служит модель, построенная для Монреаля (Канада). Именно для этого города был разработан и впервые применен программный комплекс ЕММЕ/2.

Не так давно на российском рынке почти одновременно появились две системы моделирования движения: *Vissim+Visum* (PTV Vision) и *Aimsun NG* (TSS). По своим возможностям и области решаемых за-

дач они практически идентичны и объединяют в себе полный пакет программного обеспечения для планирования, анализа и организации транспортного движения.

Наиболее широко на Российском рынке представлены программные продукты компании PTV AG – *ptv vision*® *VISUM* и *ptv vision*® *VISSIM*. Программные продукты этой компании представляют единый программный комплекс, реализующий задачи макро- и микро-моделирования транспортных систем.

Например, *ptv vision*® *VISUM* объединяет в себе полный пакет программного обеспечения для планирования, анализа и организации транспортного движения, он позволяет отображать все виды индивидуального и общественного транспорта в единой модели.

Область применения PTV Vision® обширна: от подготовки проектов организации и анализа схем движения на перекрестках и развязках до исследований комплексных транспортных систем городов и регионов, включая создание перспективных интегрированных транспортных концепций для индивидуального и общественного транспорта. Одновременно с этим PTV Vision® решает задачи оперативного и стратегического транспортного планирования.

Благодаря многообразию функций PTV Vision® круг его пользователей очень широк и разнообразен. К нему относятся проектировщики, чиновники транспортных министерств и ведомств, инженерные компании, транспортные управления, управления железных дорог и многие другие.

Уже сегодня специалисты более чем в 70 странах мира применяют PTV Vision®, а это свыше 1100 различных организаций. Пакет программ PTV Vision® привлекают для решения проблем моделирования транспортных систем такие города России, как Санкт-Петербург (ЗАО «Петербургский НИПИГрад», комитет по транспорту), Томск (Томский государственный архитектурно-строительный университет), Иркутск (Иркутский государственный технический университет).

В модуле *VISUM* PTV Vision® реализован первый уровень моделирования – макро-моделирование, в котором объектом моделирования является транспортный поток. Основными пользователями данного модуля *VISUM* PTV Vision® являются городские и федеральные департаменты и комитеты по транспорту, транспортные компании-перевозчики, транспортные компании, предоставляющие услуги общественного транспорта, компании, специализирующиеся на транспортном консультировании, а также вузы.

Областью применения PTV Vision® *VISUM* является разработка комплексных транспортных схем городов и регионов, планирование городского строительства, разработка схем перевозок, в том числе мультимодальных. Осуществляется планирование и контроль деятельности для транспортных предприятий, объединений и исполните-

лей заказов. Производится планирование рентабельности общественных пассажироперевозок с учетом требований пассажиров.

На сегодняшний день в мире существует также и множество специальных систем для микро-моделирования транспортных потоков, например, VISSIM, TRANSIMS, PARAMICS, EMME/2, SATURN.

1.3. Структурная схема прогнозной транспортной модели

Из всего разнообразия типов транспортных моделей подробнее остановимся на моделях, используемых в транспортном планировании городов. В отличие от задач организации дорожного движения, где находят широкое применение имитационные модели движения транспорта, в транспортном планировании используются прогнозные модели, оперирующие макроскопическими параметрами, описывающими транспортный поток. Такими параметрами являются: скорость транспортного потока, интенсивность транспортного потока, интенсивность пассажиропотоков.

Основой моделирования городских транспортных систем обычно является задача реализации пассажирских транспортных корреспонденций, доля которых в общем объеме транспортного движения крупного города составляет 85–95%.

Транспортная модель в целом представляет собой программный комплекс, состоящий из информационных и расчетных блоков. Информационные блоки составляют единую базу данных, предназначенную для хранения и обработки информации, необходимой для прогноза транспортных потоков. Расчетные блоки реализуют алгоритмы решения задач математического программирования, ориентированных на прогноз потребности в передвижениях и расчет реализующих ее транспортных потоков.

Любая математическая модель функционирования транспортной сети основывается на большом объеме исходных данных, получение которых вызывает серьезные затруднения. И это, в первую очередь, является основной трудностью на пути создания транспортных моделей крупных городов. Очевидно, что сбор исходных данных представляет собой наиболее трудоемкий и продолжительный по времени этап при построении транспортных моделей.

Алгоритм каждой из известных групп транспортных моделей в конечном итоге решает задачу о степени соответствия существующего транспортного спроса имеющемуся транспортному предложению. Исходя из этого и создание основы модели, и наполнение ее исходными данными можно разделить на два независимых друг от друга этапа –

это создание транспортного предложения и создание (расчет) транспортного спроса.

На заключительном этапе, когда имеются сформированные и формализованные параметры транспортного спроса и предложения, задача сводится к совершенствованию алгоритмов распределения транспортного спроса по существующему транспортному предложению и калибровке модели по собранным натурным данным, характеризующим основные параметры транспортного движения на действующей в текущий момент сети.

При этом формализация параметров, характеризующих существующее состояние дорожно-транспортного комплекса, будет являться первым этапом в создании транспортной модели города – это создание транспортного предложения. Второй этап в построении модели – создание или расчет транспортного спроса – представляет собой куда более сложную и трудоемкую задачу.

Схематично структура основных составляющих прогнозной транспортной модели представлена на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Структура основных составляющих прогнозной транспортной модели

Транспортное предложение состоит из элементов, с помощью которых транспортная система (города либо региона) удовлетворяет существующий транспортный спрос. Транспортное предложение в конечном итоге будет определять, какой объем спроса и насколько качественно может удовлетворить транспортная система.

Транспортный спрос количественно и качественно определяет потребность жителей города в перемещении.

Весь объем необходимых к формализации **исходных** данных для создания прогнозной транспортной модели состоит из большого числа составляющих:

Транспортное предложение:

- Картографическая информация (цифровой план города)
- Сеть путей движения для различных видов транспорта, ее свойства и условия движения, включая технические средства организации дорожного движения

- Типы улиц и дорог, среднегодовая суточная интенсивность, пропускная способность перегонов и перекрестков и т.д.

Транспортный спрос:

- Данные статистики: сведения о населении, о трудоспособном населении, о рабочих местах, о рабочих местах в сфере услуг, о количестве студентов и учебных местах

- Данные статистики о распределении корреспонденций по целям поездок

- Modal Split: общее разделение транспортных потоков по видам транспорта на исследуемой территории.

Более подробно необходимые исходные данные рассмотрены в разделе 3.

Расчет прогноза в такой транспортной модели осуществляется по четырехшаговому алгоритму, вследствие чего такие прогнозные транспортные модели называют «четырёхшаговыми». В создании и последующей работе такой модели можно выделить четыре этапа (шага):

1. Генерация спроса (Trip Generation)
2. Распределение спроса (Trip Distribution)
3. Выбор режима (Mode Choice)
4. Перераспределение (Traffic Assignment)

Схема четырехшаговой модели представлена на рис. 1.7. Далее будет подробно рассмотрен каждый из четырех шагов.

Сокращения и обозначения, приведенные в схеме на рис. 1.7:

МЗ – матрица затрат;

ИТ – индивидуальный транспорт;

ОТ – общественный транспорт;

МК – матрица корреспонденций;

V_0 – скорость движения транспортного потока в пустой сети;

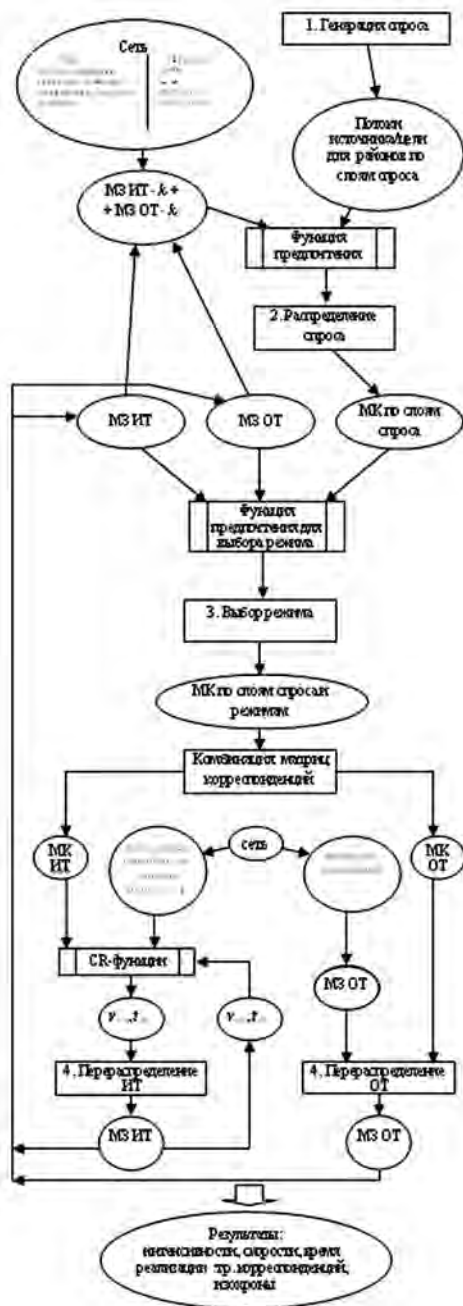


Рис. 1.7. Схема четырехшаговой транспортной модели

V_{akt} – скорость движения транспортного потока в нагруженной сети;

t_0 – время движения транспортного потока по элементу пустой сети;

t_{akt} – время движения транспортного потока по элементу нагруженной сети.

Раздел 2

Исходные данные для создания прогнозных транспортных моделей

Любая математическая модель функционирования транспортной сети основывается на большом объеме исходных данных, получение которых вызывает серьезные затруднения. И это, в первую очередь, является основной трудностью на пути создания транспортных моделей крупных городов. К таким данным относятся: дифференцированная по районам численность населения, число мест приложения труда, рекреационный потенциал, среднее время передвижения и др.

Очевидно, что сбор исходных данных составляет наиболее трудоемкий и продолжительный по времени этап при построении транспортных моделей [5–9, 2].

Различают следующие виды исходных данных, необходимых для создания прогнозных транспортных моделей:

- Исходные данные для создания модели транспортного спроса
 - Исходные статистические данные.
 - Население и трудящееся население.
 - Рабочие места и рабочие места в сфере услуг.
 - Количество студентов и учебных мест.
 - Количество школьников и учебных мест в школах.
 - Исходные данные о функционировании транспортной системы.
 - Данные об интенсивности транспортных потоков.
 - Данные о пассажирских потоках.
 - Данные о пассажиропопотоке на маршрутах городского пассажирского транспорта общего пользования (ГПТОП);
 - Данные о пассажирообороте на остановочных пунктах ГПТОП.
 - Исходные данные о транспортной подвижности населения.

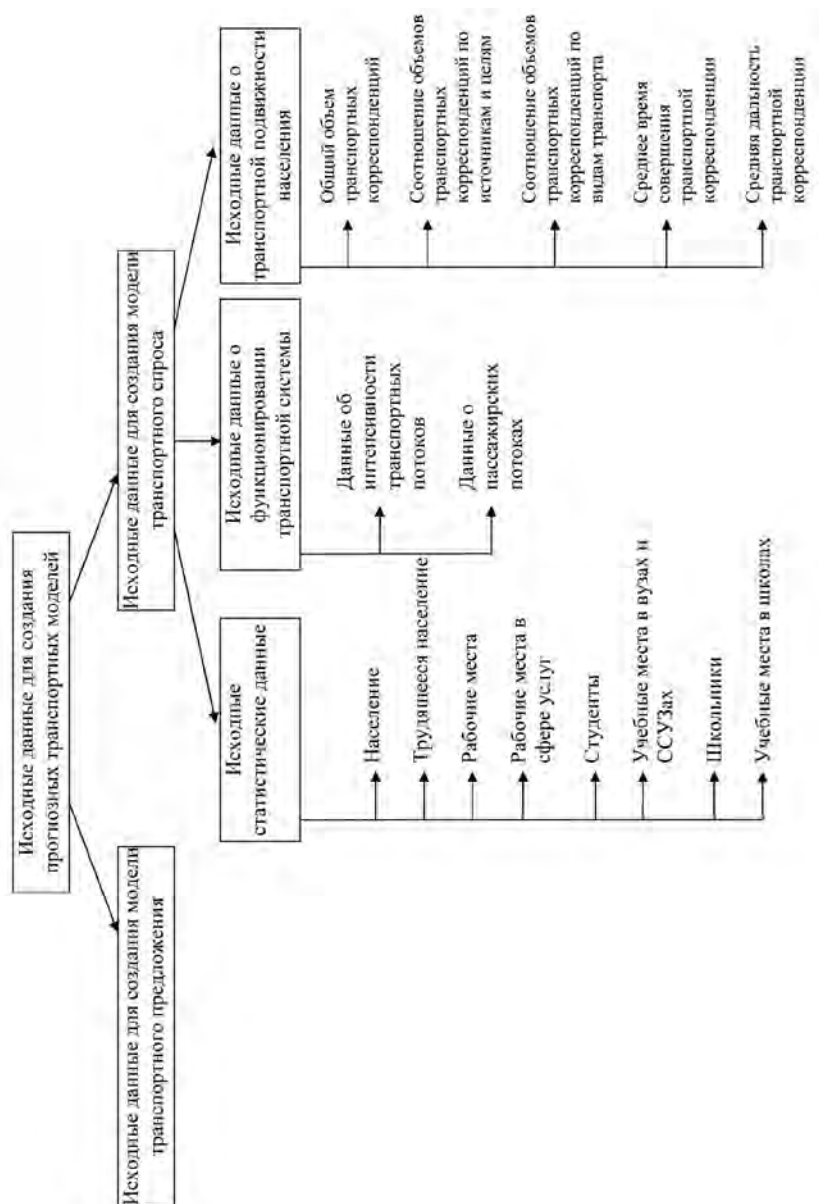


Рис. 2.1. Виды необходимых исходных данных для создания прогнозных транспортных моделей

- Исходные данные для создания модели транспортного предложения

В виде схемы необходимые для создания прогнозных транспортных моделей исходные данные представлены на рис. 2.1.

2.1. Исходные данные для создания модели транспортного спроса

2.1.1. Исходные статистические данные. Источники и методики расчета

В настоящее время в России нет налаженного механизма получения исходных статистических данных для целей транспортного планирования и моделирования от государственных органов. Часто проблема заключается в том, что предоставление данных в необходимом виде, в том числе с требуемой для целей транспортного планирования дискретностью государственными органами затруднительно, так как представители органов власти трактуют предоставление даже обезличенной информации с достаточно мелкой дискретностью (например, с точностью до здания или квартала) как нарушение федерального закона от 27 июля 2006 года № 152-ФЗ «О персональных данных».

В связи с этим для некоторых видов статистических исходных данных приходится разрабатывать специальные методики их расчета на основе имеющихся укрупненных данных, а также данных других типов.

Далее рассмотрим различные виды статистических исходных данных, возможные источники их получения и методики их расчета.

2.1.1.1. Население и трудящееся население

Основным источником информации о населении являются избирательные комиссии населенных пунктов. Данные избирательных комиссий регулярно обновляются и проверяются. Однако этот источник имеет ряд недостатков. Так, избирательные комиссии имеют данные только о населении, имеющем право голоса, то есть о совершеннолетних жителях населенного пункта. Обычно при создании транспортных моделей считается, что транспортные корреспонденции совершают совершеннолетние жители, однако при моделировании общественного транспорта бывает важно учесть также несовершеннолетних жителей.

Решить данную проблему возможно, имея в распоряжении данные фонда обязательного медицинского страхования, в базах данных которого содержится информация обо всех жителях, в том числе несовершеннолетних.

Однако стоит отметить, что оба этих источника имеют еще один недостаток: информация, имеющаяся в их распоряжении, основана на данных о месте регистрации жителей, в то время как в современных реалиях люди все чаще живут не по месту своей регистрации.

Решить подобную проблему было бы возможно в случае получения доступа к данным всероссийской переписи населения, которую периодически проводят органы государственной статистики. Так, в Англии основной источник сведений о населении и его составе, используемый при создании транспортных моделей, – результаты переписей населения, которые проводятся каждые 10 лет (Model Validation and Reasonableness Checking Manual Second Edition. Cambridge Systematics, Inc., 2010). Данные переписи позволяют оценить число фактически проживающих жителей, а не только зарегистрированных.

Трудящееся население обычно определяют на основе данных о возрасте. Обычно в качестве трудящихся принимается население в возрасте от 20 до 60 лет.

Для обеспечения удобства работы с исходными данными при создании транспортных моделей необходимо иметь исходные статистические данные с дискретизацией до конкретного адреса.

2.1.1.2. Рабочие места

При создании транспортных моделей крупных городов одной из важнейших составляющих является исходная информация о транспортном спросе [10]. Одним из ключевых параметров, определяющих транспортный спрос, выступает количество рабочих мест и степень их концентрации в пространстве города.

Очевидно, что для создания качественной модели транспортного спроса необходима информация о распределении рабочих мест по территории города. Данную информацию можно получить из различных источников: 1) данные пенсионного фонда о зарегистрированных работниках в организациях города и их юридические адреса; 2) базы данных открытых источников, которые содержат адреса организаций и их филиалов: печатные справочники, Интернет-ресурсы, компьютерные программы («Дубль ГИС», www.2gis.ru).

2.1.1.3. Рабочие места в сфере услуг

Прежде всего, дадим определение, какие рабочие места в модели транспортного спроса мы будем относить к рабочим местам в сфере услуг. Рабочие места в сфере услуг – это рабочие места, которые в течение дня привлекают не только людей, трудящихся на этих рабочих местах, но и их посетителей. К сфере услуг относятся предприятия и

организации, которые оказывают все виды коммерческих и некоммерческих услуг. Таким образом, рабочие места в сфере услуг формируют дополнительные слои транспортного спроса, так как являются целью совершения транспортных корреспонденций для населения, которое пользуется оказываемыми услугами, и источником для возвратных корреспонденций. Примеры рабочих мест в сфере услуг: магазины, кафе, больницы, детские сады и т.д.

Основные положения и гипотезы. Для выделения из общего объема рабочих мест непосредственно количество рабочих мест в сфере услуг необходимо разработать методику учета рабочих мест в сфере услуг. Методика выделения рабочих мест в сфере услуг из общего количества рабочих мест основана на предположении, что соотношение между количеством рабочих мест и количеством рабочих мест в сфере услуг для предприятий, занимающихся одной сферой деятельности, одинаковое.

Основным источником информации о сфере деятельности предприятий является открытая справочная информация, предоставляемая в открытых источниках.

Описание методики и алгоритмов учета в транспортном спросе рабочих мест в сфере услуг. Для выделения из общего объема рабочих мест параметра рабочих мест в сфере услуг можно использовать данные, опубликованные в открытых источниках. Расчет рабочих мест в сфере услуг начинается с определения сфер деятельности предприятий, которые функционируют на территории исследуемого города. Экспертным путем для каждой сферы деятельности назначается общее количество рабочих мест и из них – количество рабочих мест в сфере услуг.

Обозначим общее количество сфер деятельности в исследуемом городе как K . Значение K будет определяться по информации из открытых источников. Для каждой k -ой сферы деятельности экспертным путем задали количество рабочих мест и количество рабочих мест в сфере услуг:

$RM\ 2R_k$ – экспертно назначенное количество рабочих мест для k -ой сферы деятельности;

$RMSU\ 2R_k$ – экспертно назначенное количество рабочих мест в сфере услуг для k -ой сферы деятельности;

$k = \overline{1..K}$ – индекс сферы деятельности.

Рабочие места в сфере услуг характеризуются тем, что привлекают остальных жителей города, не занятых в данной сфере, различными

услугами, такими как продажа товаров народного потребления, оказание медицинских, образовательных и прочих видов услуг.

Однако необходимо учитывать и тот факт, что существуют офисные организации, где сотрудники прибывают на место работы и остаются на рабочем месте в течение рабочего дня, выполняя текущую работу без привлечения большого количества клиентов. Таким образом, не для каждой сферы деятельности будут заданы рабочие места в сфере услуг.

Для каждой организации в открытых источниках заданы рубрики – сфера деятельности, которой занимается организация. В зависимости от сферы деятельности производится выборка, и на основе запросов формируется количество рабочих мест и рабочих мест в сфере услуг для каждой организации.

По данным открытых источников, общее количество организаций, зарегистрированных в городе, составляет M организаций. Таким образом, для каждой j -ой организации или филиала организации находим количество рабочих мест и количество рабочих мест в сфере услуг в зависимости от ее сферы деятельности.

$RM2O_j = \sum_{k=1}^{k_j} RM2R_k$ – количество рабочих мест для j -ой организации;

$RMSU2O_j = \sum_{k=1}^{k_j} RMSU2R_k$ – количество рабочих мест в сфере услуг для j -ой организации;

k_j – количество сфер деятельности в j -ой организации; $j = \overline{1..M}$.

Далее количество рабочих мест в организациях просуммировали для каждого здания, соответственно получили количество рабочих мест и количество рабочих мест в сфере услуг в каждом здании:

$RM2_i = \sum RM2O_j$ – количество рабочих мест, полученное из общедоступных источников, для i -го здания;

$RMSU2_i = \sum RMSU2O_j$ – количество рабочих мест в сфере услуг, полученное из общедоступных источников, для i -го здания.

Общий объем рабочих мест, полученный таким образом, крайне редко соответствует объему трудящихся и существующему объему рабочих мест. Назначение рабочих мест и рабочих мест в сфере услуг с использованием общедоступных источников дает только верное со-

отношение между количеством рабочих мест и рабочих мест в сфере услуг.

Наиболее достоверные данные по количеству рабочих мест в зданиях можно получить из баз данных Пенсионного фонда РФ. Данные Пенсионного фонда РФ позволяют оценить общий объем рабочих мест на территории, а также количество трудящихся, проживающих на территории города.

Методика распределения рабочих мест в сфере услуг будет получена на основе данных о распределении рабочих мест по территории города из баз данных Пенсионного фонда РФ. Соотношение количества рабочих мест и рабочих мест в сфере услуг – на основе данных, полученных из общедоступных источников.

Таким образом, дальнейший расчет рабочих мест в сфере услуг для каждого здания будет строиться следующим образом, пусть:

$RMSU_i$ – количество рабочих мест в сфере услуг для i -го здания (расчетные данные);

RM_i – количество рабочих мест, полученное из баз данных Пенсионного фонда РФ, для i -го здания;

$RM2_i$ – количество рабочих мест, полученное из общедоступного источника, для i -го здания;

$RMSU2_i$ – количество рабочих мест в сфере услуг, полученное из общедоступного источника, для i -го здания.

Тогда

$$RMSU_i = \frac{RM_i \cdot RMSU2_i}{RM2_i}.$$

Таким образом, для каждого здания в городе будет рассчитано количество рабочих мест в сфере услуг. Рабочие места в сфере услуг будут являться источниками притяжения при совершении корреспонденций.

Обычно в транспортных моделях крупных городов используются четыре вида источников и целей совершения транспортных корреспонденций: Дом, Работа, Прочее, Учеба. К виду «Прочее» относятся культурно-бытовые и рекреационные корреспонденции, т.е. корреспонденции, для которых источниками или целями являются рабочие места в сфере услуг. Таким образом, рабочие места в сфере услуг будут

участвовать в расчете слоев спроса Дом – Прочее, Работа – Прочее, Учеба – Прочее и Прочее – Прочее.

С использованием транспортной модели города Перми были рассчитаны показатели качества транспортной модели до выделения рабочих мест в сфере услуг и после. Показателем, который отображает качество транспортной модели, является коэффициент корреляции с натурными данными (наблюдаемыми интенсивностями) [11]:

$$r = \frac{\sum (Z_i - \bar{Z}) \times (U_i - \bar{U})}{\sqrt{\sum (Z_i - \bar{Z})^2 \times \sum (U_i - \bar{U})^2}} \quad (2.1)$$

где r – коэффициент корреляции; $\bar{Z} = \frac{1}{N} \cdot \sum Z_i$, $\bar{U} = \frac{1}{N} \cdot \sum U_i$ –

средние значения наблюдаемых и расчетных значений интенсивности; Z_i – наблюдаемое значение; U_i – значение, полученное расчетным путем из транспортной модели; N – количество точек наблюдения.

Для варианта, когда слой спроса представлен общим количеством рабочих мест без выделения сферы услуг, коэффициент корреляции составил 0,666.

При создании транспортного спроса с заданием рабочих мест в сфере услуг по методике, описанной в данном разделе, – коэффициент корреляции составил 0,886. Таким образом, выделение рабочих мест в сфере услуг в отдельный слой спроса при создании транспортной модели положительно влияет на качество создаваемой транспортной модели.

2.1.1.4. Количество студентов и учебных мест

Стремительные процессы урбанизации, наблюдаемые как в России, так и во всем мире, ставят перед исследователями в области транспортного планирования городов все более расширяющийся круг задач, решение которых уже физически невозможно без применения транспортных моделей [10]. Поступающие в распоряжение транспортных инженеров алгоритмы и технологии моделирования, а также средства вычислительной техники отодвигают на второй план вопросы собственно обработки информации, делая при этом как никогда актуальной проблему качества исходной информации, создания технологий ее первичного получения и последующей актуализации [12].

В основе современных транспортных моделей городов лежат модели транспортного спроса и транспортного предложения [13, 14]. Не

ставя целью оценить значимость вклада каждой этой составляющей в итоговый результат качества создаваемой транспортной модели, можно утверждать, что создание модели транспортного спроса – процесс более затратный и технологически гораздо более сложный как на этапе сбора и подготовки необходимой информации, так и на этапе ее верификации и актуализации.

Потому актуальными и востребованными являются алгоритмы и технологии построения качественных моделей транспортного спроса на основе имеющегося в распоряжении исследователя набора исходной информации о параметрах городской структуры, этот спрос создающей.

Необходимым этапом в построении модели транспортного спроса в городах является создание структуры транспортного спроса. Одним из структурных элементов транспортного спроса служит слой спроса. Качество итоговой транспортной модели и модели транспортного спроса напрямую зависит от детализации структуры спроса (количества слоев спроса).

Минимально возможный набор слоев спроса содержит два слоя спроса. Это спрос на передвижения от дома на работу и с работы домой. Однако большинство известных и действующих на настоящий момент транспортных моделей городов содержат как минимум восемь слоев спроса [15], генераторами и потребителями транспортных корреспонденций в которых являются:

- Дом;
- Работа;
- Прочие места притяжения.

Они формируют собой девять различных комбинаций истоков и стоков транспортного движения. При этом на практике не учитывают слой спроса, основанный на передвижениях от Дома к Дому, справедливо полагая, что в современном мегаполисе понятия «дом» и «жилище» для человека являются синонимами.

Следующим этапом уточнения структуры транспортного спроса является выделение отдельных слоев спроса, связанных с передвижениями к месту учебы. Такая детализация приводит к модели спроса, состоящей из набора $15 (4^2 - 1)$ матриц корреспонденций (слоев спроса). При описании слоев спроса, связанных с перемещениями с учебными целями, определенную сложность представляет формализация распределения мест проживания учащихся по территории города.

В отличие от самих учебных мест, выделение учащейся молодежи из общего состава жителей города является задачей нетривиальной.

Данный раздел посвящен разработке алгоритма распределения учащейся молодежи по транспортным районам города для дальнейшего исследования учебных транспортных корреспонденций, то есть

корреспонденций, совершаемых студентами вузов и ССУЗов очной формы обучения на территории города.

Предлагается подход, при котором модельное распределение учащейся молодежи, проживающей на территории города, происходит на основе уже имеющейся в распоряжении исследователя информации о городской структуре. В частности, распределения мест проживания горожан и уровня автомобилизации населения.

Для решения поставленной задачи, в первую очередь, необходимо определить возрастной порог, характерный для студентов. Ориентировочный возраст студентов очной формы обучения составляет 18–23 года. Очевидно, что как неравномерность возрастного состава всех жителей на территории города, так и доля от общего числа проживающих молодых людей, учащихся вузов и ССУЗов, не позволяют применять пропорциональный подход к формализации распределения студентов по территории города в модели транспортного спроса.

Задачей будет являться нахождение алгоритма, воссоздающего реальное распределение мест проживания учащейся молодежи по территории города.

Для того чтобы определить количество студентов в транспортном районе, была выдвинута следующая гипотеза: количество студентов в транспортном районе прямо пропорционально уровню благосостояния его жителей, что в настоящий момент определяется уровнем автомобилизации населения этого района. Таким образом, предполагается, что существует некая зависимость между количеством студентов в транспортном районе и уровнем автомобилизации. В соответствии с вышеизложенной гипотезой заметим, что чем выше уровень автомобилизации в районе, тем больше студентов в этом районе должно проживать.

Для расчета количества студентов, проживающих в транспортных районах, приведем детализацию транспортного района до каждого дома. Нужно определить количество студентов, проживающих в каждом здании, учитывая не только количество жителей студенческого возраста, но и количество автомобилей, зарегистрированных в рассматриваемом здании.

Таким образом, необходимо найти количество студентов, проживающих в каждом жилом здании. Обозначим искомое количество сту-

дентов в каждом доме – S_i . Алгоритм расчета количества студентов в здании заключается в том, что требуется рассчитать количество студентов с учетом неких поправочных коэффициентов, которые определяются, исходя из количества жителей в здании в возрасте от 18 до 23 лет, количества автомобилей и уровня автомобилизации населения дома.

Для решения поставленной задачи учитывались данные о количестве населения города, в том числе с учетом возрастных ограничений:

N – количество жителей города;

M – население города в возрасте от 18 до 23 лет;

S – количество студентов в городе.

Кроме того, для построения транспортной модели использовались данные о количестве автомобилей:

A – количество автомобилей, зарегистрированных в городе;

a_i – количество автомобилей, зарегистрированных в i -м жилом здании.

Распределение жителей по территории города также известно, как и информация о количестве жилых зданий в городе в целом:

n_i – население i -го жилого здания;

m_i – население i -го жилого здания в возрасте от 18 до 23 лет;

$i = 1...K$ – индекс здания;

K – количество жилых зданий в городе.

Общий алгоритм расчета состоит из четырех шагов. Рассмотрим каждый шаг алгоритма расчета детально.

Первый шаг алгоритма расчета количества студентов в каждом здании состоит в том, что количество студентов определяется в зависимости от общего количества жителей в возрасте от 18 до 23 лет, для этого:

Для каждого здания определяется доля населения в возрасте от 18 до 23 лет, проживающего в доме, от общего количества населения в возрасте от 18 до 23 лет:

$$k_{li} = \frac{m_i}{M} \quad (2.2)$$

где k_{li} – коэффициент, учитывающий количество жителей в студенческом возрасте; m_i – население i -го здания в возрасте от 18 до 23 лет; M – количество жителей в городе в возрасте от 18 до 23 лет.

Затем рассчитываем количество студентов пропорционально доле населения в возрасте от 18 до 23 лет:

$$s_i^* = S \cdot k_{li} \quad (2.3)$$

где s_i^* – количество студентов, проживающих в i -ом жилом здании, рассчитанное пропорционально доле населения в возрасте от 18 до 23 лет; S – количество студентов в городе; k_{li} – коэффициент, учитывающий количество жителей в студенческом возрасте.

На **втором шаге алгоритма** необходимо учесть долю зарегистрированных автомобилей в жилом здании от общего количества зарегистри-

стрированных в городе автомобилей и уровень автомобилизации населения i -го здания, для этого:

1. Находим уровень автомобилизации в каждом доме (на одного жителя):

$$avt_i = \begin{cases} \frac{a_i}{n_i}, n_i > 0 \\ 0, n_i = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

где avt_i – уровень автомобилизации в каждом доме (на одного жителя); a_i – количество автомобилей в i -м здании; n_i – население i -го здания.

2. Затем определяется доля автомобилей в доме от общего количества зарегистрированных в городе автомобилей:

$$da_i = \frac{a_i}{A} \quad (2.5)$$

где da_i – доля автомобилей в доме от общего количества автомобилей; a_i – количество автомобилей в i -м здании; A – количество автомобилей в городе.

3. Далее определим коэффициент k_{2i} , который будет учитывать количество студентов, проживающих в жилом здании, в зависимости от количества автомобилей:

$$k_{2i} = (avt_i + da_i) / 2 \quad (2.6)$$

где k_{2i} – коэффициент, учитывающий уровень автомобилизации жителей дома и количество автомобилей, зарегистрированных в здании; avt_i – уровень автомобилизации в каждом доме (на одного жителя); da_i – доля автомобилей в доме от общего количества автомобилей.

4. Далее определяем количество студентов в здании, с учетом коэффициента k_{2i} :

$$s_i^{**} = s_i^* \cdot k_{2i} \quad (2.7)$$

где s_i^{**} – количество студентов, проживающих i -ом жилым зданием, рассчитанное пропорционально доле населения в возрасте от 18 до 23 лет и уровню автомобилизации;

Третий шаг алгоритма. Введем обобщенный коэффициент, который будет учитывать и количество жителей в возрасте от 18 до 23 лет, и количество автомобилей в здании. Для этого находим долю каждого

S_i^{**} в зависимости от общего количества полученных студентов:

$$k_i = \frac{S_i^{**}}{\sum_i S_i^{**}} \quad (2.8)$$

где k_i – обобщенный коэффициент, который учитывает жителей студенческого возраста и уровень автомобилизации одновременно; S_i^{**} – количество студентов, рассчитанное пропорционально доле населения в возрасте от 18 до 23 лет и уровню автомобилизации.

Определим количество студентов в каждом здании в соответствии с обобщенным коэффициентом – k_i :

$$s_i = k_i \cdot S \quad (2.9)$$

где s_i – количество студентов, в i -ом здании; S – количество студентов в городе.

Итоговое количество студентов, проживающих в жилом здании, назовем исходя из ограничения $s_i \leq m_i$:

$$s_i = \min(s_i, m_i) \quad (2.10)$$

где s_i – количество студентов в i -ом здании; m_i – население i -го здания в возрасте от 18 до 23 лет.

Так как S_i является минимальным значением из s_i и m_i , то

$$\sum_i s_i < S.$$

На **четвертом шаге алгоритма** необходимо дополнить расчетное количество студентов в каждом здании, для того чтобы $\sum_i s_i = S$.

Для этого итоговое расчетное количество студентов в здании получим путем распределения разности $S - \sum_i s_i$ пропорционально доле разности $m_i - s_i$ от разности $M - \sum_i s_i$:

$$s_i = s_i + (S - \sum_i s_i) \cdot \frac{m_i - s_i}{M - \sum_i s_i} \quad (2.11)$$

где s_i – итоговое расчетное количество студентов, проживающих в i -ом здании;

Полученное таким образом расчетное распределение учащейся молодежи используется на этапе построения слоев спроса в модели транспортного спроса, связанных с осуществлением транспортных корреспонденций с учебными целями.

Данная методика применялась для расчета распределения студентов по транспортным районам города Перми в модели транспортного спроса и при последующем анализе учебных транспортных корреспонденций.

Результаты проведенных вычислительных экспериментов на транспортной модели города позволили оценить эффективность предложенного алгоритма как способа уточнения структуры модели транспортного спроса [11].

Итоговая точность транспортной модели определяется набором показателей, одним из самых значимых показателей является коэффициент корреляции. Коэффициент корреляции показывает, насколько коррелируют полученные в результате расчетов на транспортной модели значения интенсивности движения на отдельных элементах улично-дорожной сети города с реальными наблюдаемыми значениями:

$$r = \frac{\sum (Z_i - \bar{Z}) \cdot (U_i - \bar{U})}{\sqrt{\sum (Z_i - \bar{Z})^2 \cdot \sum (U_i - \bar{U})^2}} \quad (2.12)$$

где r – коэффициент корреляции;

$\bar{Z} = \frac{1}{N} \cdot \sum Z_i$, $\bar{U} = \frac{1}{N} \cdot \sum U_i$ – средние значения наблюдаемых и расчетных значений интенсивности; Z_i – наблюдаемое значение; U_i – значение, полученное расчетным путем из транспортной модели; N – количество точек наблюдения.

Для калибровки транспортной модели города и конечной оценки ее качества используется в среднем 100 точек наблюдения ($N=100$).

В таблице (табл. 2.1) представлены итоговые оценки качества транспортной модели города Перми в виде значений коэффициента корреляции при различных способах представления модели транспортного спроса.

Представленные в табл. 2.1 значения коэффициента корреляции показывают, что детализация представления различных целей поездки в модели транспортного спроса оказывает серьезное влияние на итоговые оценочные показатели качества транспортной модели города.

С другой стороны, можно констатировать, что предложенный алгоритм формализации исходных данных для построения модели транспортного спроса на передвижения с учебными целями также оказывает положительное влияние на показатели качества транспортной модели.

Кроме того, использование для целей моделирования представленного алгоритма не потребует от исследователя сбора дополнительных данных о структуре, занятости и распределении населения по терри-

Таблица 2.1

Значение коэффициента корреляции при различных способах представления модели транспортного спроса

Различные способы формализации транспортного спроса	Значение коэффициента корреляции r
Модель транспортного спроса без выделения в отдельный слой перемещений с учебными целями (9 слоев спроса)	0,8
Модель транспортного спроса с выделением перемещений с учебными целями (15 слоев спроса), с пропорциональным распределением мест проживания студентов	0,85
Модель транспортного спроса с выделением перемещений с учебными целями (15 слоев спроса). С непропорциональным распределением мест проживания студентов на основе данных об автомобилизации	0,86

тории города, равно как проведения дополнительного анкетирования и прочих высокозатратных мероприятий. Данный алгоритм следует рекомендовать для реализации на этапе формализации исходных данных для построения модели транспортного спроса.

2.1.1.5. Количество школьников и учебных мест в школах

В ряде крупных и крупнейших городов при создании модели транспортного спроса требуется учитывать транспортные перемещения учащихся средних общеобразовательных учреждений (школ). Обычно методика построения модели транспортного спроса не предполагает учета школьников в транспортном спросе.

Обоснованием этому служат градостроительные нормы, работающие на этапе разработки проектов планировок городских территорий – районов и микрорайонов.

Согласно этим нормам каждый район города, а соответственно и транспортный район, составляющий основное деление транспортной модели города, должен быть обеспечен местами в детских школьных и дошкольных учреждениях. Исходя из этого, делается предположение о том, что учащиеся средних общеобразовательных учреждений (школ) живут в шаговой доступности до своих мест обучения и при этом не пользуются услугами общественного транспорта с учебными целями.

Наблюдаемые тенденции. В крупных и крупнейших городах сложилась ситуация, когда школьники второй и третьей ступени обучения (5–11 классы) активно пользуются общественным транспортом для реализации своих транспортных корреспонденций, связанных с учебными целями. Данная тенденция подтверждается натурными наблюдениями за составом пассажиропотока в дневное время и спросом на специальные ученические льготные проездные билеты различных форм. В целях учета наблюдаемых тенденций требуется разработка специальных методик учета спроса на транспортные перемещения учащихся средних общеобразовательных учреждений.

Основная причина появления транспортных перемещений школьников – специализация средних общеобразовательных учреждений. Специализированные школы имеют право и по логике построения учебного процесса должны привлекать «своего» ученика, живущего вне зависимости от местоположения самой специализированной школы. Вместе с тем специализированные школы ориентированы на мотивированных учащихся и соответственно их родителей.

Система рейтингов средних общеобразовательных учреждений в городах показывает неизменно высокие рейтинги по различным по-

казателям и системам оценок именно у специализированных школ, тем самым дополнительно повышая мотивацию родителей отдать ребенка на обучение именно в эту «рейтинговую» школу.

Основные предположения и гипотезы. Основной информацией для создания транспортного слоя Дом – Школа и Школа – Дом будет являться статистическая информация обо всех образовательных учреждениях в целом и о каждом образовательном учреждении в частности.

Методика учета спроса на транспортные перемещения учащихся средних общеобразовательных учреждений построена на гипотезе о том, что чем выше рейтинг общеобразовательного учреждения – тем большая доля учащихся этого учреждения живет за пределами шаговой доступности от этой школы и соответственно пользуется общественным транспортом для реализации своих транспортных корреспонденций связанных с учебными целями.

Для более точного учета транспортного спроса Дом – Школа и Школа – Дом проводятся запросы информации в учебных заведениях с целью определения общего количества учащихся и количества учащихся, прикрепленных к рассматриваемому учебному заведению.

Для учета приезжих учащихся вводятся следующие допущения (предположения):

1) Учащиеся из других районов используют для реализации своих транспортных корреспонденций, связанных с учебными целями, городской пассажирский транспорт общего пользования и могут перемещаться на индивидуальном транспорте.

2) Самостоятельно используют городской пассажирский транспорт общего пользования для реализации своих транспортных корреспонденций, связанных с учебными целями, учащиеся только второй и третьей ступени обучения (5–11 классы).

Транспортные перемещения учащихся начальной школы (первой ступени обучения – 1–4 классы) будут учитываться вместе с перемещениями их родителей, связанных с посещением мест обслуживания населения. Такие транспортные перемещения реализуются исключительно на индивидуальном транспорте. Такое допущение было принято в связи с тем, что часть учащихся среднего звена также может перемещаться на индивидуальном транспорте с родителями, а учащиеся начальных классов могут перемещаться самостоятельно на общественном транспорте.

Таким образом, соотношение между учениками, использующими для перемещения городской общественный транспорт или индивидуальный, не изменится.

Алгоритм формирования матрицы корреспонденций учащихся средних общеобразовательных учреждений: для создания модели транспортного спроса, относящегося к слою Дом – Школа и Школа – Дом, необходимы данные о расселении учеников на территории города и распределении учебных мест по территории города.

Транспортный спрос по слоям Дом – Школа и Школа – Дом строится не для всех школьников, а только для тех, кто обучается не по своему месту жительства.

Для создания транспортного спроса необходима информация о расселении учеников по территории города, а также информация о распределении учебных мест в школах.

Остановимся более подробно на распределении учебных мест в школах и их характеристиках.

Для создания полноценного транспортного спроса необходима общая статистическая информация, такая как:

- Общее количество учебных мест – Um ;
- Количество учебных мест, занимаемых учащимися по месту жительства, – Um_h ;

- Количество учебных мест в начальных классах Um_n .

Для каждого здания школы с помощью официальных запросов в учебные заведения или в департамент образования города должны быть получены следующие параметры транспортного спроса:

- Общее количество учеников в школе Um_i ;
- Количество учеников в школе, обучающихся по месту жительства, – Um_h_i .

Кроме перечисленных параметров учебных заведений необходимо рассчитать еще два параметра:

- Количество учеников, приезжающих в школу на городском общественном транспорте, – Um_OT_i ;
- Количество учеников, приезжающих в школу с использованием индивидуального транспорта, – Um_IT_i .

Расчет указанных параметров будет основан на следующем предположении: ученики начальной школы, посещающие школу не по своему месту жительства, добираются до школы с использованием индивидуального транспорта; учащиеся среднего и старшего звена добираются на городском пассажирском транспорте общего пользования.

Тогда параметры Um_OT_i , Um_IT_i будут рассчитываться следующим образом:

Для выделения в каждой школе учеников начального звена необходимо найти долю учеников, посещающих начальную школу, от общего количества учеников:

$$k = \frac{Um_n}{Um}. \quad (2.13)$$

Таким образом, количество учеников, посещающих начальную школу и обучающихся не по своему месту жительства, а следовательно, перемещающихся на индивидуальном транспорте, составит:

$$Um_IT_i = (Um_i - Um_h_i) \cdot k. \quad (2.14)$$

Число школьников, обучающихся не по своему месту жительства и перемещающихся на общественном транспорте, будет рассчитываться следующим образом:

$$Um_OT_i = Um_i - Um_h_i - Um_IT_i \quad (2.15)$$

причем для формул (2.14) и (2.15) расчет проводится для каждой i -ой школы.

Следующим этапом задания слоя транспортного спроса Дом – Школа, Школа – Дом является распределение мест жительства школьников по территории города. Так как в транспортном спросе не участвуют школьники, обучающиеся по месту жительства и совершающие пешие перемещения при посещении школы, их необходимо исключить из рассматриваемого слоя транспортного спроса.

Распределение учебных мест, которые притягивают к себе школьников из других районов, и учеников, которые обучаются в школе не по месту жительства, по территории города неравномерно. Чтобы оценить эту неравномерность по городу, было принято решение рассматривать и оценивать распределение для отдельно взятого избирательного участка.

Таким образом, чтобы выделить из расселения школьников, которые обучаются по месту жительства, необходима следующая информация:

1. Районирование территории города по избирательным округам;
2. Для каждого дома количество жителей школьного возраста – St_i .

Расчет будет проводиться следующим образом: для каждого j -го избирательного участка формируется общее количество жителей школьного возраста St_j :

$$St_j = \sum_{i=1}^M St_i, \quad (2.16)$$

где M – количество жилых зданий на территории j -ого избирательного участка.

Кроме того, на территории j -го избирательного участка необходимо рассчитать количество учебных мест в школах и количество учащихся,

посещающих школу по месту жительства, Um_h_j :

$$Um_h_j = \sum_{i=1}^K Um_h_i, \quad (2.17)$$

где K – количество школ на территории j -го избирательного участка.

Внутри избирательного участка количество школьников, проживающих на его территории, будет уменьшаться равномерно по всему избирательному участку; коэффициент, на который будет произведено уменьшение, рассчитывается следующим образом:

$$a_j = \frac{St_j - Um_h_j}{St_j}. \quad (2.18)$$

Таким образом, для каждого жилого здания на территории j -го избирательного участка, количество школьников которые будут участвовать в транспортном спросе типа Дом - Школа, Школа – Дом, будет рассчитано:

$$St'_i = a_j \cdot St_i. \quad (2.19)$$

Округление до целого необходимо провести случайным образом, для того чтобы общий баланс школьников сошелся с количеством учебных мест в школах, участвующих в транспортном спросе на территории всего города.

Приведенные методики распределения учебных мест в школах и школьников на территориях крупных городов позволяют детализировать слой транспортного спроса с учебными целями. В последую-

шем такая детализация позволит создавать более качественные транспортные модели крупных городов.

2.1.2. Исходные данные функционирования транспортной системы. Методики сбора данных

2.1.2.1. Сбор исходных данных об интенсивности транспортных потоков

Сравнение различных способов сбора исходных данных об интенсивности транспортных потоков. На практике существуют и применяются различные способы и методы сбора информации об интенсивности транспортных и пешеходных потоков. Сбор такой информации проводят с различными целями [16]. Так, информация об интенсивности движения транспортных средств на перегоне является основой для расчета характеристик дорожной одежды при реконструкции улично-дорожной сети.

Информация об интенсивности движения транспортных и пешеходных потоков на перекрестке с различных направлений движения является основой проектов организации дорожного движения, в том числе с использованием различных технических средств регулирования. Процесс разработки проектных предложений по организации дорожного движения и реконструкции участков улично-дорожной сети обычно начинается со сбора информации об интенсивности транспортных и пешеходных потоков.

Интенсивность движения на улично-дорожной сети в городах неравномерна в течение суток, поэтому сбор данных, которые необходимо получить для каждого конкретного объекта, следует проводить, как минимум, в течение дневного периода времени с 7-00 часов до 20-00 часов.

Кроме того, для получения объективной и достоверной информации об интенсивности движения транспортных и пешеходных потоков на исследуемых объектах необходимо провести сбор данных одновременно в нескольких точках обследования. Получение дневных данных таким способом является дорогостоящим мероприятием.

В ходе исследования были использованы несколько способов сбора информации, касающейся интенсивности транспортных потоков. Качество получаемой информации зависит от способа сбора данных об интенсивности движения [17]. Для оценки качества получаемой информации проводится сравнительный анализ данных по интенсивности транспортных и пешеходных потоков, полученных различными способами.

На практике используются три основных способа сбора информации:

1. ручной способ;
2. полуавтоматический;
3. автоматический.

Для проведения всестороннего анализа необходимо оценить рассматриваемые способы получения информации по следующим составляющим: по затратам на обследование, по объемам получаемых данных и по качеству получаемой информации.

Остановимся на каждом из перечисленных основных способов сбора информации об интенсивности движения транспортных потоков более подробно.

Первый способ. Ручной способ сбора данных (натурный сбор данных). При ручном способе непосредственный сбор данных производится учетчиками транспорта. Это специально обученные люди, которые стоят на перекрестках в течение дня и проводят замеры интенсивности движения с различных направлений (рис. 2.2). На практике используют различные способы подсчета транспортных средств натурным образом.

Один из способов сбора натуральных данных разработан и успешно используется специалистами Пермского национального исследовательского политехнического университета. Этот способ включает сбор следующих показателей:

- количество автомобилей (ед.), въезжающих на перекресток с каждого направления за 5 минут в каждом получасовом интервале, в том



Рис. 2.2. Натурный сбор данных

числе: легковые автомобили, грузовые автомобили, общественный транспорт;

- количество автомобилей, движущихся через перекресток в различных направлениях;
- количество пешеходов, переходящих, проезжую часть, с каждого направления за 5 минут в каждом получасовом интервале.

В течение каждого получаса учетчик-оператор выполняет ряд последовательных действий: занимает позицию, удобную для визуального наблюдения за транспортными средствами, въезжающими на перекресток с первого направления, в течение пяти минут считает количество транспортных средств, которые въезжают на перекресток с первого направления, а также количество пешеходов, переходящих проезжую часть с первого направления по обе стороны дороги; собранные данные вносит в рабочий лист. Затем, в следующие 5-минутные интервалы, переходит проезжую часть и таким же образом считает количество транспортных средств и пешеходов со второго направления; потом с третьего и четвертого.

В начале следующей половины часа оператор размечает новый рабочий лист и начинает следующий замер, повторяя предыдущий алгоритм действий.

Сбор данных производится в течение интервала с 7-00 до 20-00 в две смены. В конце рабочей смены информацию с рабочих листов учетчик вносит в контрольную карту. В результате проведения замеров в контрольную карту заносятся данные об интенсивности движения транспортных и пешеходных потоков, а также о распределении транспортных потоков по направлениям.

Следующим этапом является обработка оператором полученных данных в специализированном программном обеспечении. Таким образом, при ручном способе сбора данных вся необходимая информация об интенсивности движения транспортных и пешеходных потоков собирается и обрабатывается вручную.

Второй способ. Полуавтоматический способ сбора данных. Полуавтоматический способ сбора информации заключается в том, что сбор информации осуществляется с помощью специального видеоборудования, которое позволяет производить съемку на всем обследуемом перекрестке, а обработка собранной информации производится вручную. При этом данные вносятся сразу в базу данных, то есть отсутствует этап ввода собранных данных в контрольную карту.

Сбор данных для такого способа осуществляется с помощью таких устройств, как камеры видеонаблюдения, установленные на улично-дорожной сети (рис. 2.3), и специально сконструированные мобильные автономные камеры видеонаблюдения (рис. 2.4).



Рис. 2.3. Купольная камера видеонаблюдения

В настоящее время для оперативного регулирования дорожного движения в центральной части города, а также на крупных транспортных развязках устанавливают системы автоматизированного управления дорожным движением. Системы АСУДД (автоматизированная система управления дорожным движением) предусматривают установку на перекрестках видеокамер, данные с которых передаются на сервер в виде видеофайлов. Видеокамера,

установленная на перекрестке, фиксирует все транспортные средства, которые передвигаются в зоне ее видимости.

Для сбора информации со всех направлений движения используют купольные камеры видеонаблюдения. Один из вариантов такой камеры представлен на рис. 2.3. Такая камера имеет большой угол обзора (до 130 градусов) и, кроме того, может вращаться на 360 градусов, что позволяет оператору АСУДД оценивать загруженность перекрестка со всех направлений.

К недостаткам таких устройств можно отнести неориентированность на сбор данных: их расположение не всегда может быть оптимальным для достижения данной цели. Помимо этого, подобными камерами оборудовано малое количество перекрестков города.



Рис. 2.4. Мобильная автономная камера видеонаблюдения

Для сбора информации об интенсивности движения на перекрестках, где не установлены стационарные видеокамеры, возможно использование специально сконструированного мобильного автономного устройства.

Устройство состоит из автомобильного видеорегистратора, блока питания и устройства для крепления (рис. 2.4). Мобильное устройство

крепится на высоте порядка 8 метров на одну из опор линий электропередачи непосредственно на обследуемом перекрестке. Продолжительность съемки ограничивается емкостью установленного в устройство аккумулятора.

Главным недостатком устройств такого типа является сложность монтажа, так как не на всех перекрестках присутствуют доступные свободные опоры. Кроме того, требуется установка устройства на достаточно большую высоту, так как для сбора данных необходим обзор всего перекрестка. С другой стороны, основными достоинствами данного типа устройств являются мобильность и энергонезависимость.

Полученные видеоматериалы обрабатываются оператором ПК с использованием специализированного программного обеспечения для проведения учета транспорта. Специализированное программное обеспечение позволяет оператору напрямую осуществлять ввод количества транспортных средств с видеозаписи и в автоматическом режиме заполнять базу данных обследования.

Таким образом, существенным отличием второго способа сбора данных от первого является то, что непосредственный подсчет интенсивности движения транспортных потоков производится одновременно с вводом информации в базу данных. Такой способ позволяет получать более достоверную информацию по сравнению с первым, так как не зависит от погодных условий, при ухудшении которых учетчики транспорта могут допускать ошибки. Кроме того, данные, полученные вторым способом, можно верифицировать на основании сохраненной записи с видеорекамеры.

Третий способ. Автоматический способ сбора данных. Третий способ сбора данных по интенсивности транспортных потоков заключается в сборе данных с детекторов учета транспорта. Такой способ актуален для участков улично-дорожной сети, где установлены детекторы учета транспорта различных типов. Существует множество детекторов, которые разделяются на типы по принципу их действия: инфракрасные, объемные, индукционные и т.д.

В городе Перми используются инфракрасные детекторы учета транспорта, которые смонтированы непосредственно над полосами движения (рис. 2.5, 2.6). Эти детекторы являются одной из составляющих АСУДД и используются на перекрестках центральной части города. При проезде транспортного средства по участку УДС, над которым установлен детектор, он реагирует и отправляет информацию в центр обработки информации, где информация обрабатывается с использованием специализированного программного обеспечения. В результате сбор данных происходит полностью автоматически.

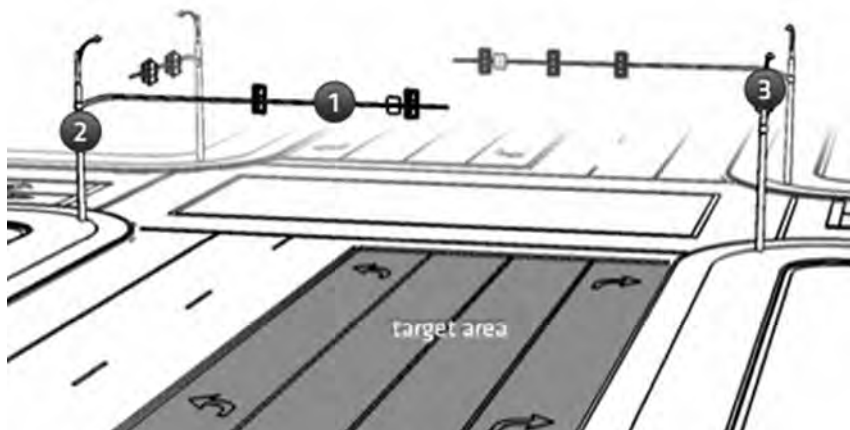


Рис. 2.5. Схема расстановки детекторов учета транспорта



Рис. 2.6. Инфракрасные детекторы транспорта

Преимущества и недостатки описанных способов сбора информации. Каждый из рассмотренных способов сбора информации об интенсивности транспортных и пешеходных потоков имеет свои преимущества и недостатки. Выделим основные показатели, по которым будут оцениваться преимущества и недостатки:

1. Единовременные затраты;
2. Текущие затраты;

3. Временные затраты на сбор/обработку информации;
4. Оценка качества собранных данных.

1. Ручной способ сбора данных

1.1. Единовременные затраты

Единовременные затраты на проведение обследования интенсивности транспортных потоков первым способом включают в себя обучение учетчиков. Один инструктаж занимает примерно 2 часа и проводится сразу для всех учетчиков за день до начала обследований.

Для проведения обучения требуется помещение, способное вместить всех учетчиков и оборудованное для проведения презентаций (школьная доска, флип-чарт или проектор). Кроме того, всех учетчиков необходимо обеспечить раздаточным материалом с методическими указаниями, картами местности, формами для заполнения и средствами безопасности (светоотражающие жилеты).

1.2. Текущие затраты

Текущие затраты состоят из заработной платы учетчиков транспорта и заработной платы операторов, обрабатывающих исходную информацию. Обычно используется почасовая оплата труда. При этом затраты напрямую зависят от количества исследуемых перекрестков и периода сбора информации – или в часы пик, или в течение всего дня.

Возможны два варианта распределения рабочего времени и количества рабочей силы: большое количество учетчиков и сбор всей информации в течение одного дня, малое количество учетчиков и сбор всей информации в течение недели. Варианты будут отличаться только затратами на обучение.

Стоит иметь в виду, что в том случае, если сбор информации осуществляется в течение всего дня, один учетчик транспорта в силу объективных причин может провести сбор информации только в течение половины дневного времени, следовательно, для обследования одного перекрестка в течение дня требуется привлечь минимум двух учетчиков.

Таким образом, при необходимости провести сбор информации сразу на большом количестве перекрестков необходимо привлечь к работе достаточно большое количество учетчиков.

1.3. Временные затраты на сбор/обработку информации

На обработку результатов замера (ввод в базу данных) с одного перекрестка требуется около часа времени. В итоге текущая стоимость сбора данных с одного перекрестка составляет 13-часовую оплату труда учетчика и часовую оплату труда оператора.

1.4. Оценка качества собранных данных

Погрешности в результате подсчета возникают в первую очередь из-за человеческого фактора. Человек может что-то не заметить, устать, проявить халатность и невнимательность. Для проверки данных необходим опытный оператор, который сможет оценить представленные ему исходные данные натурных замеров. Кроме того, сбор данных проводится только в течение пяти минут в каждые полчаса с одного направления движения.

Для перехода к интенсивности за полчаса полученные таким образом значения умножаются в последующем на шесть. Таким образом, вводится дополнительная погрешность.

2. Полуавтоматический способ сбора данных

2.1. Единоновременные затраты

Единоновременные затраты, необходимые для сбора информации с использованием видеокамер, – это затраты на приобретение самих видеокамер, а также на монтаж в случае использования стационарных камер.

2.2. Текущие затраты

Для мобильных камер наблюдения текущие затраты состоят из заработной платы установщика мобильной камеры видеонаблюдения. Для стационарных камер текущие затраты – это затраты на электроэнергию, канал связи, техническое обслуживание. Для обоих типов камер текущие затраты включают также заработную плату оператора по обработке видеoinформации.

2.3. Временные затраты на сбор/обработку информации

Стационарные камеры видеонаблюдения запись видеоматериалов ведут круглосуточно, поэтому временных затрат на сбор данных нет. Для мобильных видеокамер, кроме того, необходимы работы по установке и демонтажу камеры. Впоследствии необходимо обработать полученные видеоматериалы. На обработку оператором данных, полученных в течение дня с одного перекрестка, затрачивается 8-часовая рабочая смена.

2.4. Оценка качества собранных данных

Отличие второго способа сбора данных об интенсивности движения транспортных и пешеходных потоков от первого способа заключается в том, что для второго способа существует возможность подсчета всех транспортных средств, попадающих в зону видимости камеры наблюдения, в течение всего периода наблюдений (или часов пик, или дня).

Для первого же способа подсчет транспортных средств с каждого направления ведется по 5 минут в течение получасового интервала времени.

Недостатком второго способа является то, что не все транспортные средства могут попадать в зону видимости камеры, особенно в случае использования стационарных камер. В итоге с направлений, которые не попадают в зону видимости камеры, осуществить подсчет транспортных средств невозможно.

Стоит отметить, что мобильные видеокамеры также не всегда возможно установить оптимальным образом.

3. Автоматический способ сбора данных

3.1. Единовременные затраты

Единовременные затраты необходимые для сбора информации с использованием датчиков учета транспорта, – это затраты на приобретение датчиков и их установку.

3.2. Текущие затраты

Текущие затраты включают в себя затраты на техническое обслуживание датчиков учета транспорта, канал связи и электроэнергию.

3.3. Временные затраты на сбор/обработку информации

Главное преимущество в использовании датчиков учета транспорта заключается в том, что вся информация с них обрабатывается и вносится в базу данных в автоматическом режиме и не требует дополнительных временных затрат на обработку материалов об интенсивности движения транспортных потоков.

Кроме того, данный способ сбора информации позволяет без дополнительных временных затрат накапливать большой массив информации за любые временные периоды, что предоставляет возможность анализировать суточные, недельные, сезонные изменения интенсивностей на исследуемом перекрестке и даже изменения интенсивности по отдельным годам.

3.4. Оценка качества собранных данных

На качество результатов, полученных этим способом, могут повлиять следующие факторы:

- неисправность одного из датчиков приводит к тому, что учет будет производиться не для всех полос движения;
- если транспортное средство перемещается не строго по центру полосы, тогда на него могут среагировать одновременно два датчика, или не среагирует ни один из датчиков.

Сравнительный анализ качества полученной информации. Для проведения сравнительного анализа качества сбора информации об интенсивности транспортных и пешеходных потоков был обследован перекресток ул. Ленина и Комсомольского проспекта города Перми. Обследуемый перекресток находится в центральной части Перми. Обследования проводились в рабочие дни, как для утреннего, так и для вечернего часа пик. Движение на перекрестке в пиковое время возрастает до предела его пропускной способности для каждого направления, поэтому мы имеем одинаковые значения интенсивности в разные дни и, следовательно, можем сравнивать результаты. Для исследуемого перекрестка был проведен сбор натурных данных об интенсивности транспортных и пешеходных потоков тремя описанными выше способами.

Фрагмент участка улично-дорожной сети, включающего перекресток ул. Ленина и Комсомольского пр., приведен на рис. 2.7. Крупными римскими цифрами отмечены направления, с которых транспортные средства въезжают на перекресток.

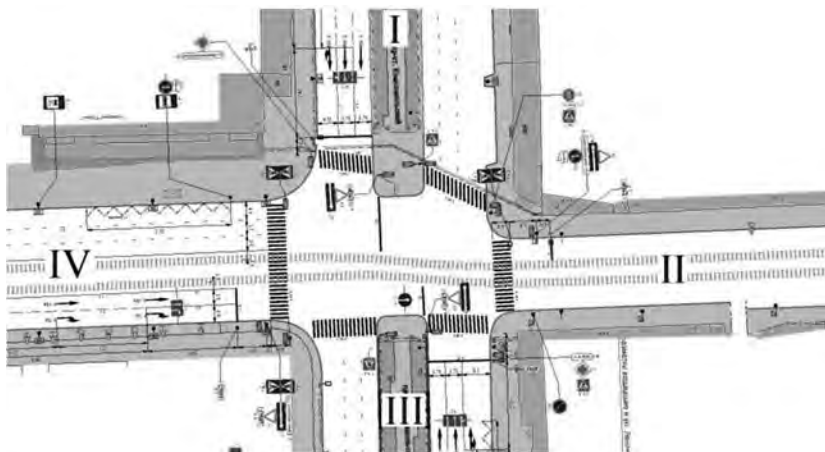


Рис. 2.7. Фрагмент исследуемого участка – перекресток ул. Ленина – Комсомольский пр. в городе Перми

Приведем примеры исходной информации, которая была получена описанными выше способами.

1. Ручной способ сбора данных

На рис. 2.8 представлен пример контрольной карты, которые заполняют учетчики транспорта при проведении замеров.

2. Полуавтоматический способ сбора данных

На рис. 2.9 приведен кадр видеозаписи, которая ведется на перекрестке ул. Ленина – Комсомольский пр. В данном случае используется стационарная камера, установленная на перекрестке.

[illegible]

Рис. 2.8. Контрольная карта учета транспорта



Рис. 2.9. Фрагмент видеозаписи на исследуемом перекрестке

3. Автоматический способ сбора данных.

На рис. 2.10 представлены диаграммы исходных данных для различных временных интервалов, полученных с датчиков учета транспорта, установленных на перекрестке.

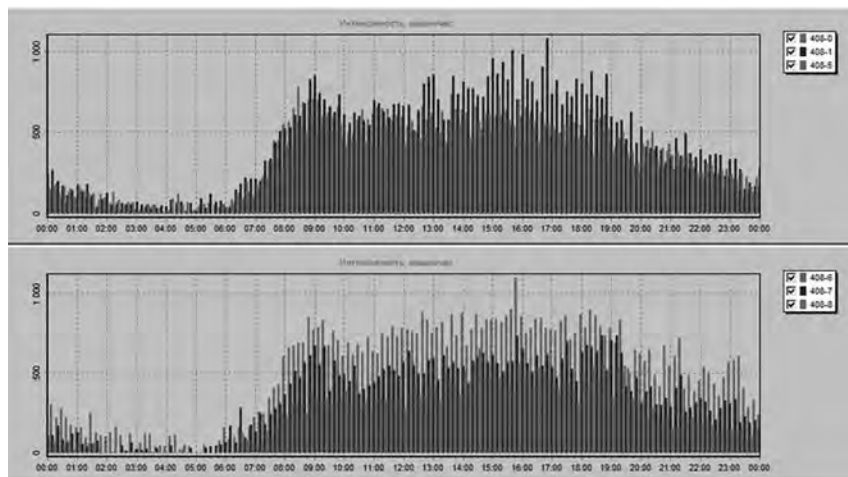


Рис. 2.10. Диаграммы данных об интенсивности движения транспортных потоков

Данные об интенсивности, полученные различными способами, как представлено на рис. 2.8, 2.9 и 2.10, обрабатывались оператором. Временные затраты на обработку исходных данных для каждого рассматриваемого способа различны:

- 1) для 1-го способа обработка материалов составляет один час;
- 2) для 2-го способа – 3 часа;
- 3) для 3-го способа – 15 минут.

Информация на перекрестках собиралась в будние дни в пиковые интервалы времени. Так как корреспонденции, совершаемые в будние дни в пиковые часы, связаны, в основном, со слоями спроса Дом–Работа, Работа–Дом, то интенсивность движения на перекрестке остается практически неизменной в различные будние дни в течение недели.

Таким образом, проведение сравнительного анализа для одного перекрестка для различных будних дней недели является адекватным. После обработки полученных различным способом данных об интенсивности транспортных потоков были получены следующие результаты, которые приведены в табл. 2.2 и 2.3.

Опишем особенности получения данных для рассматриваемого перекрестка.

Таблица 2.2

**Интенсивность движения транспортных средств для утреннего часа пик
(авто/ч)**

Название направлений	Способ		
	ручной	полуавто-матиче-ский	автомати-ческий
I. С северного направления (по Комсомольскому пр. от ул. Петропавловской)	810	1008	903
II. С восточного направления (по ул. Ленина от ул. Газеты Звезда)	606	720	486
III. С южного направления (по Комсомольскому пр. от ул. Кирова)	870	965	1515
IV. С западного направления (по ул. Ленина от ул. Куйбышева)	1038	1010	889

Таблица 2.3

**Интенсивность движения транспортных средств для вечернего часа пик
(авто/ч)**

Название направлений	Способ		
	ручной	полуавто-матиче-ский	автомати-ческий
I. С северного направления (по Комсомольскому пр. от ул. Петропавловской)	1224	1158	1006
II. С восточного направления (по ул. Ленина от ул. Газеты Звезда)	654	687	541
III. С южного направления (по Комсомольскому пр. от ул. Кирова)	984	1067	1347
IV. С западного направления (по ул. Ленина от ул. Куйбышева)	1086	813	753

Данные, полученные первым способом, имеют погрешность из-за того, что для каждого направления обследование в течение часа проводилось два раза по 5 мин.

Данные, полученные вторым способом, являются более достоверными, так как подсчет транспортных средств проводился для каждого направления движения в течение всего часа с видеоматериалов, полученных с использованием купольной камеры видеонаблюдения.

На рассматриваемом перекрестке данные, полученные третьим способом, имеют погрешность, так как количество исправных датчиков, установленных на одном направлении, не соответствует количеству полос движения в рассматриваемом направлении.

Количество исправных датчиков, для которых производился подсчет для каждого направления движения, составляет:

- С ул. Петропавловская – два датчика, установленных над 1-й и 2-й полосой (3 полосы движения).
- С ул. Газеты Звезда – один датчик (1 полоса движения).
- С ул. Кирова – три датчика, установленных над всеми полосами движения (3 полосы движения).
- С ул. Куйбышева – один датчик, установленный над 1-ой полосой (2 полосы движения).

В данном исследовании подсчет данных с видеозаписи производился трижды, тремя разными операторами. Итоговые результаты усреднялись. Ввиду того, что подсчет данных с видеозаписи можно провести несколько раз с целью их уточнения, информация, получаемая вторым способом, окажется наиболее полной и достоверной.

Таким образом, данные, полученные полуавтоматическим способом, будут являться эталонными. Именно с ними будут сопоставляться данные, полученные другими способами.

Введем обозначения:

I_{1i} – интенсивность движения с i -го направления, полученная 1-м способом, ТС/ч;

I_{2i} – интенсивность движения с i -го направления, полученная 2-м способом, ТС/ч.

Для каждого направления на исследуемом перекрестке рассчитаем относительное отклонение от эталонных значений интенсивности движения:

$$\Delta_i = \left| \frac{I_{1i} - I_{2i}}{I_{2i}} \right| \cdot 100\%. \quad (2.20)$$

Рассчитанные значения относительных отклонений для первого способа сбора информации приведены на диаграмме (рис. 2.11).

Сравнительный анализ результатов обследования транспортных потоков, проведенного натурным путем (1 способ) и с использованием

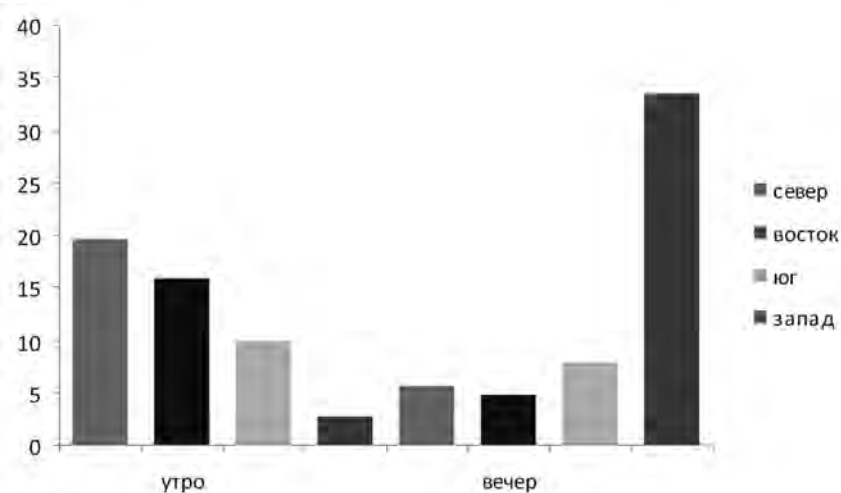


Рис. 2.11. Значения относительных отклонений для 1-го способа сбора информации от эталонных значений

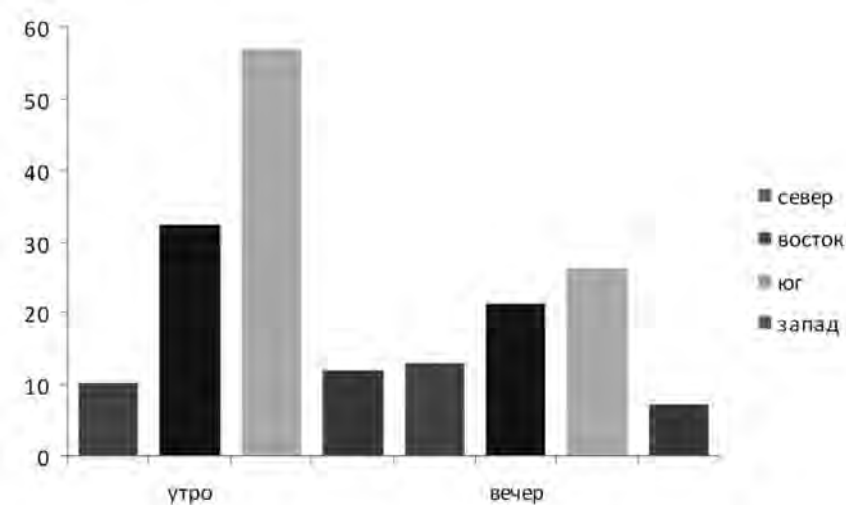


Рис. 2.12. Значения относительных отклонений для 3-го способа сбора информации от эталонных значений

видеосъемки (2 способ), показывает, что относительные отклонения в данных составляют от 3 до 33,5%, в среднем относительное отклонение составляет 12,5%.

Максимальное отклонение в данных по интенсивности было получено для вечернего часа пик с западного направления (движение по

ул. Ленина от ул. Куйбышева). Распределение входящего потока с западного направления осуществляется в двух направлениях: прямо и направо.

Транспортный поток, движущийся с западного направления направо, на камере видеонаблюдения отслеживается не в полном объеме, поэтому возникают максимальные относительные отклонения в данных об интенсивности движения транспортных потоков. Для остальных направлений движения отклонения не превышают 20%.

Далее был проведен сравнительный анализ для 2-го и 3-го способов сбора данных, результаты анализа приведены на диаграмме (рис. 2.12).

Сравнительный анализ результатов обследования транспортных потоков при проведении 2-го и 3-го способа показал, что относительные отклонения в полученных данных составляют от 7 до 57%, среднее относительное отклонение составляет 22,5%. При проведении детального анализа по направлениям движения каких-либо закономерностей установить не удалось.

Учет транспортных средств, движущихся с III-го направления – с ул. Кирова по Комсомольскому пр., проводился с использованием датчиков и видеонаблюдения в полном объеме. В итоге были выявлены различия между результатами, полученными с детекторов, и результатами, полученными с видеонаблюдения.

В утренний час пик данные, полученные с детекторов, были больше на 57% , в вечерний час пик – на 26%. Это связано, прежде всего, с тем, что детекторы могут посчитать одно и то же транспортное средство несколько раз.

Для потока, движущегося с ул. Газеты Звезда, сложилась противоположная ситуация: в утренний час пик данные, полученные с детекторов, были меньше на 32,5%; в вечерний час пик – меньше на 21%.

Опираясь на полученные результаты, мы можем сделать вывод, что отклонения, полученные при сравнении 3-го способа со 2-м способом, существенны и составляют в среднем более 22,5%. Кроме того, не ведется учет интенсивности пешеходного движения. Таким образом, проводить учет интенсивности с использованием стационарных инфракрасных детекторов нецелесообразно, так как получаемая информация не является достоверной.

Выводы и рекомендации. В ходе научного исследования были проведены замеры транспортных потоков тремя различными способами на одном из наиболее оживленных перекрестков города Перми. Были описаны недостатки и достоинства различных способов сбора данных. Проведен анализ затрат, необходимых для проведения обследования одного перекрестка.

Анализ показывает, что наиболее затратным является 3-й способ сбора информации, так как требуются расходы на приобретение датчиков, которые необходимо установить над каждой полосой движения. Следующим по количеству издержек способом является 2-й способ, так как для его использования необходима только камера видеонаблюдения и ее монтаж. И наименее затратным способом сбора информации является натурный способ сбора данных.

По результатам проведенного анализа собранных данных можно сделать следующие выводы.

1) Наиболее точными данными об интенсивности движения транспортных потоков являются данные, полученные вторым способом. Рассматриваемый способ оказывается приоритетным при получении данных интенсивности транспортных и пешеходных потоков. Недостаток второго способа заключается в ограниченном количестве видеокамер: их стоимость достаточно высока. Этот фактор влияет на то, что на данный момент невозможно провести единовременное масштабное обследование. Единственным возможным вариантом получения данных в рамках второго способа является единовременный сбор информации со стационарных камер, а затем ее дополнение материалами, полученными с помощью мобильных видеокамер. Такая процедура занимает достаточно большое количество времени.

2) Данные, полученные натурным способом, имеют погрешность от 5 до 20%. Такие данные можно использовать при обосновании проектов организации дорожного движения, а также при калибровке транспортных моделей.

3) Сбор данных с использованием датчиков учета транспорта показал недостоверность получаемых данных, погрешности составляют более 20%. Кроме того, не производятся замеры пешеходного движения. Использовать данные, полученные третьим способом, при обосновании проектов организации дорожного движения на перекрестках нецелесообразно.

Рекомендации по использованию того или иного способа сбора информации можно дать, опираясь на результаты сравнительного анализа данных по интенсивности транспортных потоков. Сравнительный анализ показал, что для получения исходной информации для единичных перекрестков необходимо использовать полуавтоматический способ сбора информации. Если использование полуавтоматического способа сбора информации невозможно на исследуемом перекрестке, то целесообразно использовать натурный способ сбора данных.

Использование натурального способа сбора данных применимо при проведении масштабного обследования интенсивности движения транспортных и пешеходных потоков в городе.

Для решения задачи измерения интенсивности транспортных потоков использование детекторов нецелесообразно, так как собранные

с помощью детекторов данные имеют большую погрешность. Прямое назначение инфракрасных детекторов транспорта заключается в измерении плотности потока путем измерения интервалов между движущимися транспортными средствами.

Таким образом, система АСУДД подбирает оптимальные режимы переключения фаз светофорного регулирования, а не замеряет абсолютные значения интенсивности движения.

Сбор данных о суточной интенсивности транспортных и пешеходных потоков

Сбор данных об интенсивности транспортных и пешеходных потоков на различных участках улично-дорожной сети необходим для проведения калибровки транспортной модели.

Сбор исходных данных для создания первичной транспортной модели проводится не на всех перекрестках города, а только на узловых пересечениях. Так, для города Перми сбор данных проводился на 260 перекрестках города (рис. 2.13), для города Самара – на 76 перекрестках (рис. 2.14).



Рис. 2.13. Картограмма дислокации мест обследования интенсивностей транспортных потоков в городе Перми



Рис. 2.14. Картограмма обследования интенсивностей транспортных потоков в городе Самара

Сбор данных для актуализации транспортной модели необходимо проводить масштабно, не реже чем раз в 5 лет. Так, в Перми подобного рода обследования проводились в 2001, 2006 и 2011 годах.

Таблица 2.4

Пример заполненной контрольной карты для сбора значений интенсивности транспортных и пешеходных потоков

Фамилия И.О. оператора		№ перекрестка	Дата:	День недели	Контрольная карта									
Бабий А. Н.														
Характеристики напряженности транспортных потоков														
направления въезда на перекресток														
№	время	с I направления				со II направления				количество пешеходов				
		кол-во а/м, въезжающих на перекресток		кол-во а/м, поворачивающих в направлении:		кол-во а/м, въезжающих на перекресток		кол-во а/м, поворачивающих в направлении:						
		ЛА	ГА	ОТ	П	III	IV	ЛА	ГА	ОТ	III	IV	I	
15	13:30	36	20	2	2	54	2	2	11	1		8	4	1
16	14:00	26	17	1	1	42	1	1	8	2	1	10	1	
17	14:30	26	11	2		38	1	1	6	1	1	8		1
18	15:00	28	23	1	3	48	1		16	2	1	17	2	2
19	15:30	27	17		1	43		1	4	4		8		1
20	16:00	33	11	2		46			13	3	1	15	2	2
21	16:30	25	17		1	40	1		7	2	1	8	2	1
22	17:00	34	11	2		47			10	4	1	14	1	
23	17:30	38	18	2	2	56			12		1	12	1	
24	18:00	49	7	4	1	58	1	1	13	1	1	14	1	3

25	18:30	26	11	2	2	37			15	2	1	13	1	4	
26	19:00	25	15	2	2	40		1	9	1	1	7	2	2	1
27	19:30	24	10	5	2	37			10			8		2	
		направления въезда на перекресток													
№	время	с IV направления						кол-во пешеходов	с III направления						количество пешеходов
		кол-во а/м, въезжающих на перекресток		кол-во а/м, поворачивающих в направлении:					кол-во а/м, въезжающих на перекресток		кол-во а/м, поворачивающих в направлении:				
		ЛА	ГА	ОТ	I	II	III		ЛА	ГА	ОТ	IV	I	II	
15	13:30	3					3		30	16	2	1	41	6	
16	14:00	2				1	1		35	14			43	6	
17	14:30	2	1			1	2		39	17	1	1	47	9	1
18	15:00	3			1		2	3	48	19	2		57	12	
19	15:30	3					3		39	15	1	1	36	18	
20	16:00	3	1			1	3		44	13	3	1	43	16	
21	16:30	2					2	2	33	13	3	4	36	9	3
22	17:00	3				1	2		61	9	4	2	61	11	
23	17:30	1	1		1		1	2	62	12	5		56	23	
24	18:00	1			0		1		57	14	3		59	15	1
25	18:30	2			1		1	4	34	8	2		29	15	
26	19:00	2				2	1	1	51	4	1		38	18	
27	19:30	1	1				1	2	61	11	2		58	16	

Для проведения масштабных обследований лучше всего использовать натурный способ сбора информации об интенсивности транспортных и пешеходных потоков. При участии большого количества учетчиков обследование возможно проводить в кратчайшие сроки, за 1–2 недели.

Пример собранных учетчиком данных в виде контрольной карты приведен выше на рис. 2.8. Пример оцифрованной в электронном виде контрольной карты приведен в табл. 2.4.

В настоящее время для проведения натурального сбора информации об интенсивности транспортных и пешеходных потоков используется методика, разработанная специалистами Пермского национального исследовательского политехнического университета. Методика сбора натуральных данных о суточной интенсивности транспортных и пешеходных потоков, а также образцы рабочих листов и контрольных карт приведены в Приложении 1.

2.1.2.2. Сбор данных о пассажирских потоках

Сбор данных о пассажиропотоках на маршрутах городского пассажирского транспорта общего пользования. Данные о пассажиропотоке на маршрутах городского пассажирского транспорта общего пользования (ГПТОП) обычно собираются организатором пассажирских перевозок с интервалом примерно раз в полгода в ходе плановых обследований пассажиропотока. При проведении подобных обследований кроме общего пассажиропотока на маршруте обычно собирают данные о количестве пассажиров по группам в зависимости от способа оплаты проезда – проездные билеты и т.п.

Примеры итоговых результатов проведенных обследований на маршрутах городского пассажирского транспорта общего пользования города Перми приведены в табл. 2.5.

Сбор данных о пассажирообороте на остановочных пунктах городского пассажирского транспорта общего пользования. Методика сбора натуральных данных о пассажирообороте на остановочных пунктах ГПТОП и образец контрольной карты приведены в Приложении 2.

Необходимость сбора данных о пассажирообороте на остановочных пунктах ГПТОП в дополнение к данным о пассажиропотоке на маршрутах ГПТОП связана с тем, что данные о суммарном пассажиропотоке на маршруте не дают сведений о пространственном распределении спроса на общественный транспорт.

Обычно обследуются наиболее нагруженные остановки, включающие в себя несколько остановочных пунктов, имеющие большой объем входящих/выходящих пассажиров или большой объем пересаживаю-

Таблица 2.5

Помаршрутное обследование пассажиропотока на автобусных маршрутах города Перми

Маршрут	Дата	Тип дня	Разовые билеты	ЛПД Студенческий	ЛПД Школьный	СПД Региональный	СПД. Муниципальный	Всего
1	09.12.2009	среда	21 500	5 971	1 131	3 377	974	32 953
2	09.12.2009	среда	8 923	1 119	571	1 394	415	12 422
3	22.12.2009	вторник	11 205	2 554	413	1 497	428	16 097
4	22.12.2009	вторник	6 243	1 295	359	710	387	8 994
5	09.12.2009	среда	4 742	866	549	967	458	7 582
6	09.12.2009	среда	564	219	136	221	273	1 413
7	09.12.2009	среда	2 005	296	200	418	251	3 170
8	09.12.2009	среда	12 750	2 368	1 086	1 834	838	18 876
10	09.12.2009	среда	12 390	2 690	921	1 925	1 135	19 061
11	09.12.2009	среда	15 193	3 564	807	2 127	627	22 318
12	09.12.2009	среда	868	59	45	86	40	1 098
13	22.12.2009	вторник	14 677	3 162	559	1 778	479	20 655
14	22.12.2009	вторник	20 582	4 208	1 648	3 100	1 123	30 661
15	09.12.2009	среда	8 632	1 261	526	965	302	11 686
16	09.12.2009	среда	14 076	1 827	1 420	2 377	750	20 450
17	09.12.2009	среда	75	50	38	158	102	423
18	09.12.2009	среда	6 086	702	183	646	152	7 769

Продолжение табл. 2.5

Маршрут	Дата	Тип дня	Разовые билеты	ЛПД Студенческий	ЛПД Школьный	СПД Региональный	СПД. Муниципальный	Всего
19	22.12.2009	вторник	22 544	5 172	745	2 842	731	32 034
20	09.12.2009	среда	28 208	5 486	2 623	3 994	1 781	42 092
21	09.12.2009	среда	1 613	137	172	315	103	2 340
22	09.12.2009	среда	1 789	193	197	280	148	2 607
25	09.12.2009	среда	1 698	660	157	431	169	3 115
26	09.12.2009	среда	1 175	44	33	601	86	1 939
27	09.12.2009	среда	14 110	3 039	794	2 119	571	20 633
29	09.12.2009	среда	1 418	97	116	448	61	2 140
30	09.12.2009	среда	18 177	4 155	675	2 135	1 487	26 629
31	09.12.2009	среда	51		1	3	1	56
32	09.12.2009	среда	11 108	1 475	486	1 130	368	14 567
34	09.12.2009	среда	1 241	308	149	246	164	2 108
35	09.12.2009	среда	249	121	86	170	125	751
36	09.12.2009	среда	12 218	4 389	1 240	2 581	1 001	21 429
37	09.12.2009	среда	2 465	735	304	783	425	4 712
38	09.12.2009	среда	1 782	330	335	427	230	3 104
39	09.12.2009	среда	1 093	232	61	145	47	1 578
40	09.12.2009	среда	8 757	2 431	499	1 390	288	13 365

Продолжение табл. 2.5

Маршрут	Дата	Тип дня	Разовые билеты	ЛПД Студенческий	ЛПД Школьный	СПД Региональный	СПД Муниципальный	Всего
41	09.12.2009	среда	3 480	3 763	295	433	204	8 175
42	09.12.2009	среда	6 462	1 179	317	816	311	9 085
43	09.12.2009	среда	9 106	1 147	548	1 432	337	12 570
44	09.12.2009	среда	3 121	488	255	554	173	4 591
45	09.12.2009	среда	5 836	1 098	414	1 052	245	8 645
47	09.12.2009	среда	3 083	515	308	852	326	5 084
48	09.12.2009	среда	1 041	137	178	150	87	1 593
49	09.12.2009	среда	1 986	226	90	158	72	2 532
50	09.12.2009	среда	4 030	235	252	1 362	151	6 030
51	09.12.2009	среда	314	53	31	59	49	506
53	09.12.2009	среда	9 151	2 258	454	892	548	13 303
54	09.12.2009	среда	249	25	28	53	61	416
56	09.12.2009	среда	6 644	1 028	353	969	263	9 257
58	09.12.2009	среда	1 399	98	139	236	128	2 000
59	09.12.2009	среда	23 732	2 946	1 735	3 366	1 177	32 956
60	09.12.2009	среда	5 510	1 553	611	1 070	627	9 371
61	09.12.2009	среда	1 005	144	30	60	15	1 254
62	09.12.2009	среда	7 214	1 306	562	1 243	477	10 802

Окончание табл. 2.5

Маршрут	Дата	Тип дня	Разовые билеты	ЛПД Студенческий	ЛПД Школьный	СПД Региональный	СПД. Муниципальный	Всего
63	09.12.2009	среда	10 716	2 341	424	1 506	442	15 429
64	09.12.2009	среда	6 549	1 088	363	822	195	9 017
65	09.12.2009	среда	1 885	158	184	368	60	2 655
66	09.12.2009	среда	9 328	1 659	563	1 456	410	13 416
67	22.12.2009	вторник	8 574	1 755	576	1 784	481	13 170
68	09.12.2009	среда	17 436	5 708	1 289	2 908	1 177	28 518
71	09.12.2009	среда	7 222	1 149	714	1 121	538	10 744
72	09.12.2009	среда	7 476	1 488	341	1 039	302	10 646
73	09.12.2009	среда	6 768	628	392	719	194	8 701
74	22.12.2009	вторник	17 278	1 920	831	2 046	589	22 664
75	09.12.2009	среда	141	104	63	120	76	504
76	09.12.2009	среда	58	44	31	54	36	223
77	09.12.2009	среда	36 635	6 377	1 836	3 898	1 029	49 775
80	09.12.2009	среда	10 576	1 307	646	1 541	398	14 468



Рис. 2.15. Картограмма обследования пассажирских потоков городского пассажирского транспорта общего пользования в городе Пермь

щихся пассажиров. Обычно количество таких остановок составляет 10–15, количество остановочных пунктов доходит до 40–50.

Для обследования пассажиропотоков в городе Перми было проведено обследование на 81 остановочном пункте (22 остановках). Дислокация мест обследования приведена на рис. 2.15.

В обследовании пассажиропотоков в городе Самара было проведено обследование на 82 остановочных пунктах (23 остановках). Дислокация мест обследования приведена на рис. 2.16 (стр. 76).

2.1.3. Исходные данные о транспортной подвижности населения

Сбор данных о транспортной подвижности населения основан на домашнем интервьюировании респондентов, распределенных по территории города согласно принципам квотной выборки в соответствии с пространственным распределением населения и его половозрастной структурой.

Опрос проводился на основе специально разработанного Опросного листа.



Рис. 2.16. Картограмма обследования пассажирских потоков городского пассажирского транспорта общего пользования в городе Самара

Объектом измерения является поездка как акт пространственного перемещения жителя в пределах города и с пересечением его границ, предпринимаемого им с какой-либо целью. В течение исследуемых суток фиксировались все поездки – полная цепочка передвижений – респондента в будний, или, реже, в выходной день.

Существенными являются характеристики поездки, описывающие жителя, совершающего поездку, ее цель, пространственные и временные координаты поездки и составляющие ее звенья. При интервьюировании жителей должны были быть получены ответы на вопросы:

- КТО совершает поездку,
- С какой ЦЕЛЬЮ,
- ОТКУДА и КУДА поездка совершается,
- КОГДА поездка начинается и заканчивается,
- КАКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА житель использует.

Ответы на перечисленные вопросы не дадут безусловных абсолютных характеристик потребностей населения в услугах городского пассажирского транспорта, поскольку измерение зафиксирует лишь параметры равновесия, наступившего в результате реализации объективных потребностей в перемещениях в конкретных социально-экономических, градостроительных и собственно транспортных условиях.

Потребности, таким образом, стеснены неудовлетворительностью качества услуг, ограниченностью ресурсов жителя и города и могут высвободиться (или напротив, становиться еще более стесненными) по мере изменения условий их реализации.

Поэтому, чтобы прогнозировать динамику изменения потребностей в транспортных услугах, важно измерить в зависимости от социально-экономической, градостроительной и транспортной ситуации вариацию таких показателей, как:

- качество предоставляемых транспортных услуг;*
- поведенческие характеристики жителя;*
- ресурсные возможности жителя.*

Ниже представлен перечень основных блоков информации, получение которой является целью проведения опроса и обработки его результатов:

- пространственное распределение спроса на услуги городского пассажирского транспорта (включая индивидуальный транспорт)
 - матрицы полного суточного цикла межрайонных корреспонденций, включая трудовые, деловые, учебные поездки и поездки по всем другим видам целей. При этом фиксируется и исследуется время начала и окончания каждой поездки;
 - закономерности пространственного распределения спроса;
- целевая подвижность населения;
- транспортная (учетная) подвижность населения;
- неравномерность спроса на услуги городского пассажирского транспорта в течение суток;
 - качество услуг городского пассажирского транспорта
 - продолжительность поездок;
 - продолжительность подхода к остановке;

- продолжительность ожидания на остановке;
- продолжительность подхода к цели от последней остановки;
- продолжительность пересадки;
- комфорт поездки (наполнение в подвижном составе);
- пересадочность.

Аналогичные опросы традиционно проводятся в европейских странах, прежде всего в Германии.

Более подробно о построении и методике проведения опросов о подвижности населения можно прочитать на официальных сайтах опросов «SrV» (http://www.tudresden.de/srv/SrV_Web/) и «MiD» (<http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/>).

2.2. Исходные данные для создания модели транспортного предложения

2.2.1. Исходные данные для создания модели транспортного предложения индивидуального транспорта

2.2.1.1. Создание геометрии улично-дорожной сети

Для создания транспортного предложения индивидуального транспорта, которое состоит из перекрестков (узлов) и участков дорог между перекрестками (перегонов), необходимы данные, созданные в геоинформационных системах (ГИС).

В свою очередь данные для ГИС поступают из различных источников.

1) Использование различного навигационного оборудования, такого как навигаторы с записью треков. С использованием такого оборудования задаются отрезки между перекрестками, точные по своей геометрии. Одним из общедоступных источников информации являются карты для навигаторов; к примеру, для города Перми таким ресурсом является <http://gpsmap.perm.ru/permkray/index.html>. Карты открываются с помощью программного комплекса MapEdit.

Пример фрагмента карты в программном комплексе MapEdit приведен на рис. 2.17.

2) Использование топографических съемок и их оцифровка. Так, для города Перми разработана специализированная геоинформационная система «Вега». Фрагмент участка территории города Перми, оцифрованный в программном комплексе ГИС «Вега», приведен на рис. 2.18.

Представленная на рис. 2.17 и 2.18 УДС экспортируется в программный комплекс PTV Vision VISUM, с помощью формата данных *.shp.

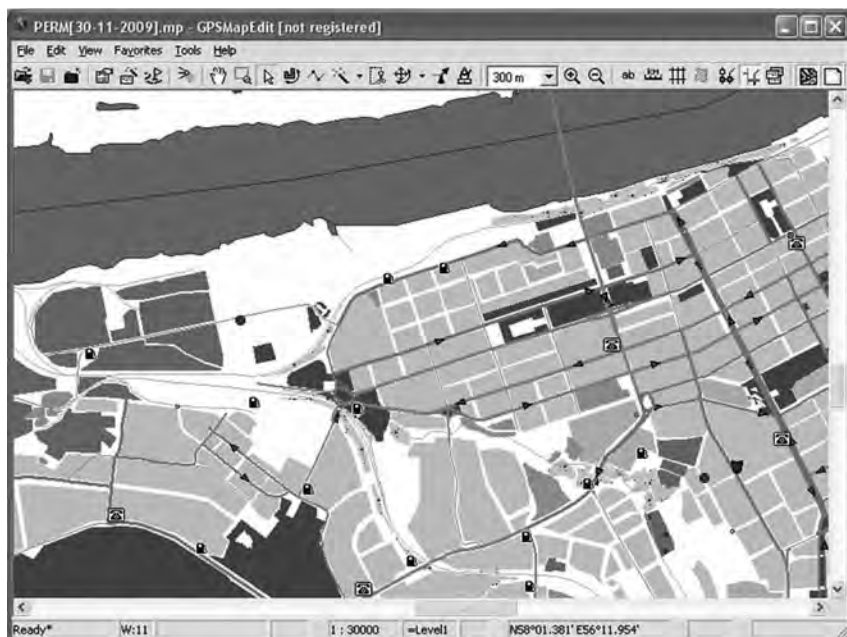


Рис. 2.17. Фрагмент центральной части территории города Перми
в программном комплексе MapEdit



Рис. 2.18. Фрагмент центральной части территории города Перми
в программном комплексе ГИС «Вега»

2.2.1.2. Исходные данные о существующей организации дорожного движения

Одной геометрии участка УДС для расчета на транспортной модели недостаточно, необходимы такие характеристики, как количество полос движения, пропускная способность перегона, а также скоростной режим движения на участке УДС.

Для перекрестков необходимо проводить учет светофорного регулирования с заданием направлений движения и продолжительности фаз.

Знаки и разметка на улично-дорожной сети

Для задания параметров улично-дорожной сети как на перегонах, так и на перекрестках используют ручной способ ввода данных в программный комплекс PTV Vision VISUM. Задаются такие параметры, как количество полос движения на перегоне и перекрестке, скоростной режим движения на перегоне. Исходными данными для задания параметров УДС являются различные источники:

1) Проекты по организации дорожного движения. Проекты организации дорожного движения для города Перми созданы в программном комплексе VStreets. Фрагмент нескольких участков УДС в программном комплексе VStreets представлен на рис. 2.19.

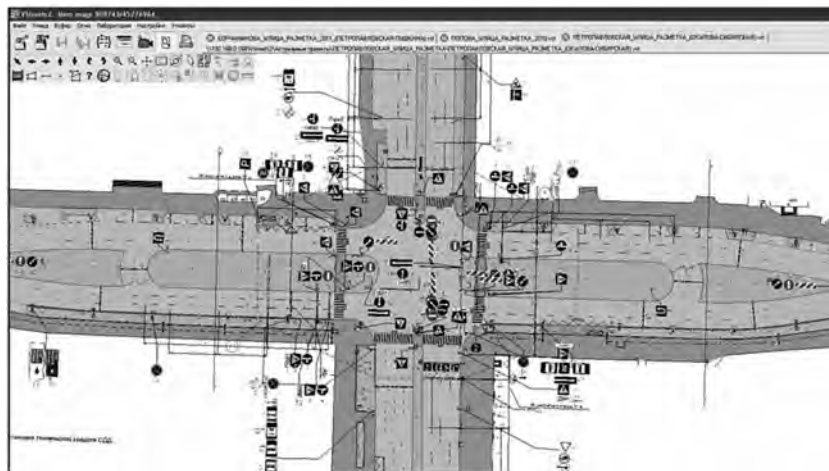


Рис. 2.19. Проект организации дорожного движения на перекрестке ул. Попова и ул. Ленина в городе Перми

2) Панорамные видеосъемки. Для задания количества полос в городах Самара и Екатеринбург на начальном этапе использовались видеоматериалы, представленные на общедоступных ресурсах, таких как Яндекс.Карты.

Проводится анализ видеоматериалов, имеющихся на интернет-ресурсах, таких как <http://maps.yandex.ru>.

Так, на рис. 2.20 представлен видеофрагмент ул. Малышева в городе Екатеринбург, на котором можно визуальнo оценить количество полос движения, предусмотренное на исследуемом участке УДС.



Рис. 2.20. Видеофрагмент участка ул. Малышева в городе Екатеринбург

Светофорное регулирование

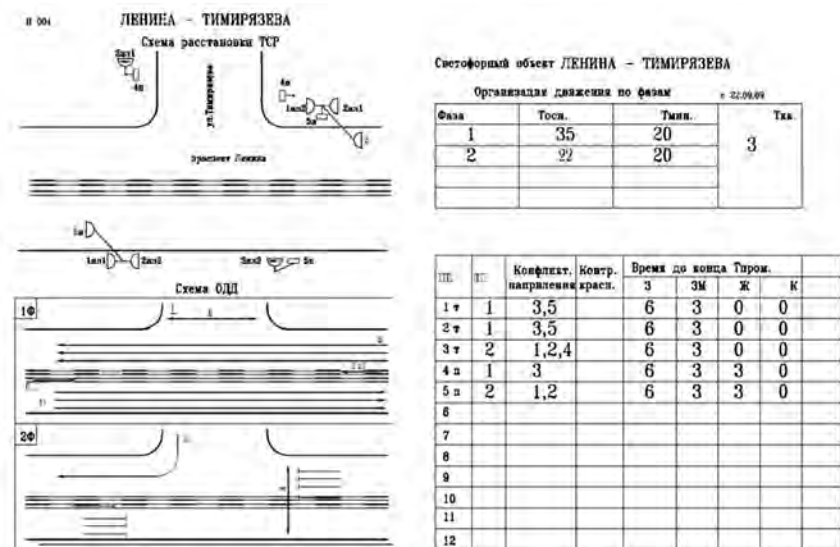
Для задания светофорного регулирования на перекрестках также используется ручной способ ввода данных в программный комплекс PTV Vision ®VISUM.

Исходными данными о направлении движения и фазах светофорного регулирования служат паспорта светофорных объектов и натурный сбор данных о светофорном регулировании.

1) Паспорта светофорных объектов.

Хранение информации о работе светофорных объектов осуществляется с использованием различных программных комплексов. Так, для города Екатеринбурга используется программный комплекс AutoCAD.

Пример паспорта светофорного объекта на перекрестке ул. Ленина и ул. Тимирязева приведен на рис. 2.21.



2) Натурный сбор данных о светофорном регулировании.

Данные в виде паспортов светофорного объекта не всегда удается получить в кратчайшие сроки, поэтому используется натурный сбор данных. Для натурального сбора данных о светофорном регулировании используется разработка специалистов Пермского национального исследовательского политехнического университета (Приложение 3).

Пример заполненного бланка для Х-образного перекрестка приведен на рис. 2.22 (стр. 83).

2.2.2. Исходные данные для создания модели транспортного предложения общественного транспорта

Для создания транспортного предложения, кроме информации о геометрии улично-дорожной сети и организации дорожного движения на УДС, необходима информация о действующей маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования (ГПТОП). Маршрутная сеть ГПТОП состоит из остановочных пунктов, маршрутов движения и расписания движения маршрутов ГПТОП.

Остановочные пункты и маршруты движения городского пассажирского транспорта общего пользования. Для задания остановоч-

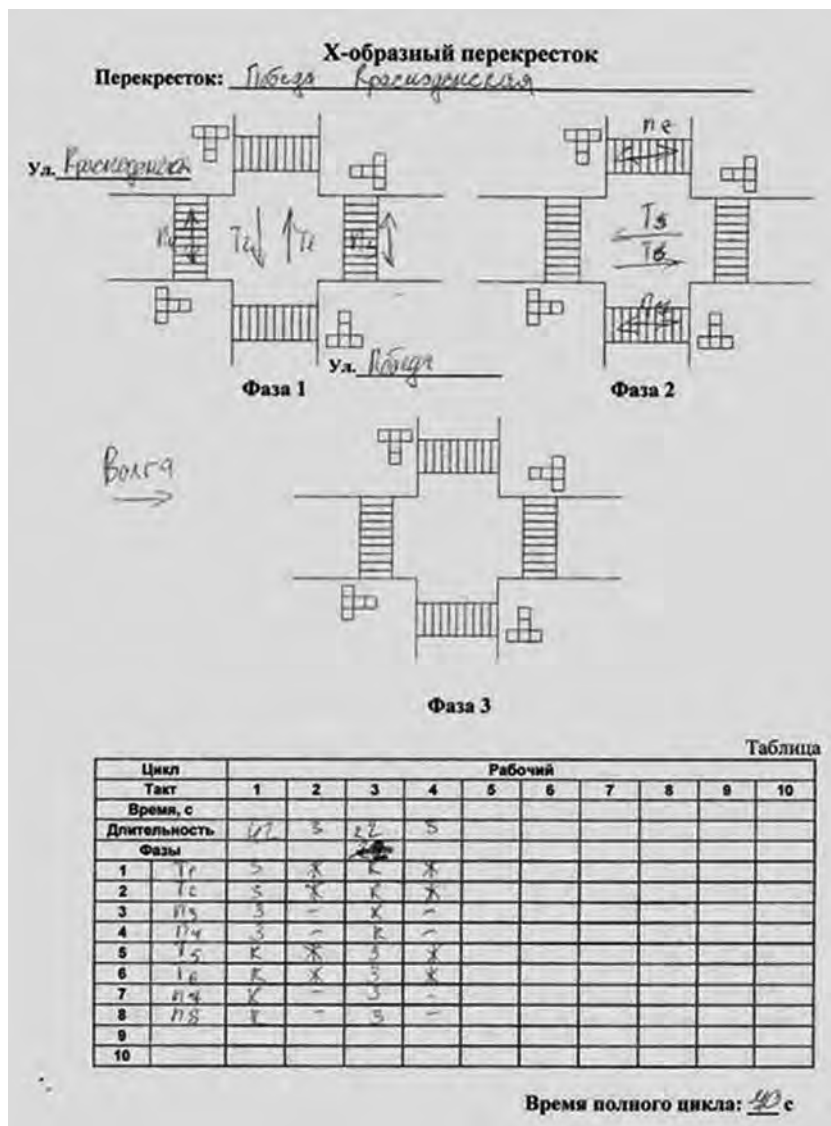


Рис. 2.22. Бланк светофорного объекта на перекрестке
ул. Победа – ул. Краснодонская в городе Самара

ных пунктов и маршрутов движения ГПТОП в транспортной модели используют различные источники информации, например, такие как:

- 1) данные, переданные отделами городской администрации, отвечающими за работу общественного транспорта;
- 2) данные, полученные из справочной системы «Дубль ГИС» (обработываются с помощью ГИС).

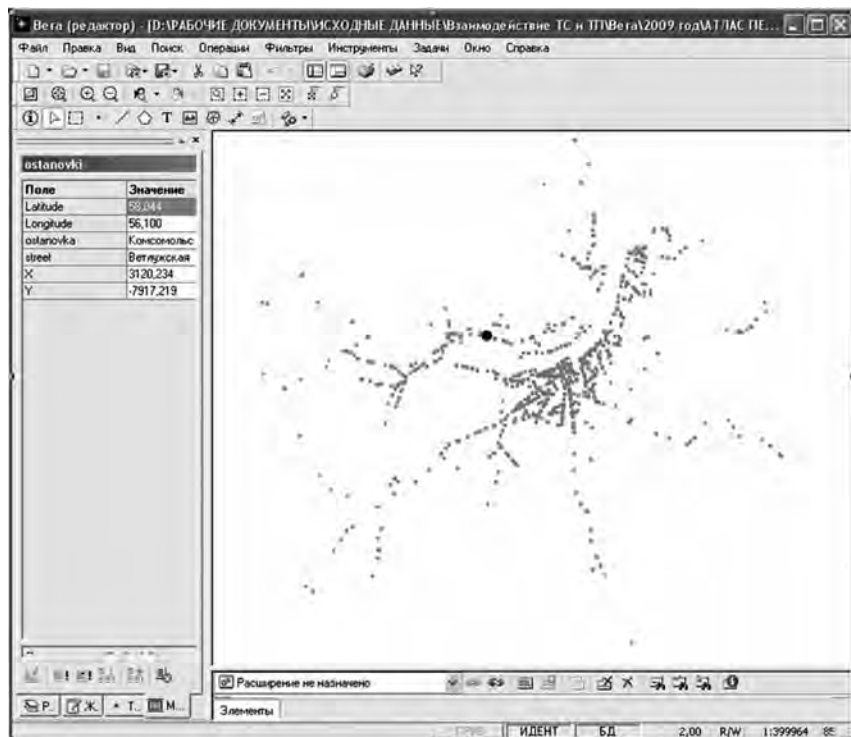


Рис. 2.23. Остановочные пункты города Перми в ГИС «Вега»

Информацию по остановочным пунктам возможно внести автоматически в программный комплекс PTV Vision @VISUM, с использованием формата *.shp.

Пример оцифрованных остановочных пунктов для города Перми приведен на рис. 2.23.

Маршруты движения ГПТОП задаются в программном комплексе PTV Vision @VISUM ручным способом.

Так, к примеру, в справочной системе «Дубль ГИС» выбирается маршрут движения ГПТОП (рис. 2.24), и в программном комплексе PTV Vision @VISUM движение маршрута задается вручную по существующим перегонам и узлам через уже заданные остановочные пункты.

Расписание движения маршрутов городского пассажирского транспорта общего пользования. Расписание движения маршрутов ГПТОП можно получать, так же как и остановочные пункты и маршруты движения, из двух источников информации.



Рис. 2.24. Маршрут движения трамвая №2 в Екатеринбурге в справочной системе «Дубль ГИС»

1) Данные могут быть переданы отделами городской администрации, отвечающими за работу общественного транспорта, к примеру, диспетчерскими службами организаторов перевозок. Информацию возможно экспортировать с использованием базы данных определенной структуры. Для каждого программного обеспечения структура базы данных может быть различна.

2) Данные могут быть получены из открытых источников в сети Интернет, где организаторы пассажирских перевозок размещают расписание движения маршрутов ГПТОП. К примеру, для города Перми таким источником является <http://map.gptperm.ru/>. Данные в программный комплекс PTV Vision ®VISUM заносятся ручным способом.

Раздел 3

Моделирование транспортного спроса

Спрос на транспорт представлен в виде матрицы (матрицы корреспонденций): для элемента матрицы корреспонденций индивидуального транспорта (ИТ) единицей измерения является «поездка автомобиля», для элемента матрицы корреспонденций общественного транспорта (ОТ) – «поездка людей».

Каждый элемент матрицы представляет собой количество необходимых перемещений из транспортного района i в транспортный район j . Матрица спроса на транспорт (матрица корреспонденций) относится к интервалу времени (время исследования) и поэтому содержит только поездки, которые проходят в пределах этого интервала времени.

Поездки, сведенные в матрицу, могут относиться к системам транспорта (например пешком, на велосипеде, на ОТ, на ИТ), к группе людей (например работающие, ученики) или к целям поездки (например профессия, поход за покупками, свободное время). Одна матрица спроса присваивается одному сегменту спроса.

При формировании спроса на транспорт могут возникнуть расхождения между значениями, полученными в результате проводимых опросов, и рассчитанными значениями, а также между значениями, полученными на текущий период времени, и значениями прогноза будущего транспортного спроса.

Спрос на транспорт, полученный в результате опроса, описывает число поездок и распределение их в пределах ограниченного периода времени (при наличии предложения транспортных услуг). Спрос является объективным «снимком» транспортной ситуации, существующей в настоящий момент, поэтому невозможно точное повторное воспроизведение такой же ситуации на практике.

Точное определение существующего спроса на транспорт практически невозможно, так как для этого необходимо проводить одновременный опрос всех участников транспортного движения.

Проведение сплошной выборки практически неосуществимо, поэтому для определения спроса на транспорт чаще всего используется алгоритм выборочного опроса участников дорожного движения. Затем из полученных в ходе опроса данных формируются отдельные элементы матрицы корреспонденций для транспортных условий, существующих в настоящий момент.

Рассчитанный спрос на транспорт содержит предположения о количестве поездок и об их распределении. Существуют различные виды расчета транспортного спроса (в зависимости от используемых исходных данных). Спрос может быть рассчитан на текущий период и на прогнозируемый период:

- Рассчитанный спрос обозначается как сегодняшний спрос на транспорт, если основой вычисления спроса является существующая в настоящий момент структура расселения, существующая социально-экономическая структура населения и предложение транспортных услуг.

- В основе прогнозируемого спроса лежит прогнозируемая структура расселения, прогнозируемая социально-экономическая структура населения и прогнозируемое предложение транспортных услуг.

3.1. Расчет транспортного спроса

3.1.1. Генерация транспортного спроса. Сегменты и слои транспортного спроса

В городах транспортный спрос определяется показателями транспортной подвижности населения (средней, часовой, километровой). В отличие от транспортного предложения, которое довольно легко формализуется, понятно и может быть детально структурировано, понятие транспортного спроса и подвижности населения нуждается в более глубоком осмыслении.

Основные входные параметры транспортного спроса и транспортного предложения отображены на рис. 3.1.

На рис. 3.1 МЗ ИТ – матрица затрат для индивидуального транспорта, а МЗ ОТ – матрица затрат для общественного транспорта.

Процедура генерации спроса

Построение модели транспортного спроса возможно при формализации исследуемой территории. Вся исследуемая территория делится



Рис. 3.1. Этапы создания транспортного спроса и предложения

на n областей, называемых транспортными районами. Транспортные районы имеют свой номер и уникальную конфигурацию, максимально повторяющую элементы городской среды.

Транспортный спрос рассчитывается на основе данных о количестве генерирующих и поглощающих транспортные потоки сущностей (например, количество населения, количество рабочих мест), затрат на корреспонденции между районами (также представленных в виде матриц) и показателей подвижности (общее количество перемещений, количество перемещений определенным видом транспорта, по целям поездки), которые являются исходными данными к задаче генерации транспортного спроса.

Обозначим: Q_i – объем движения из района i , Z_j – объем движения в район j , эти значения будут рассчитываться следующим образом:

$$Q_i = \sum_g a_g SG_g(i); \quad (3.1)$$

$$Z_j = \sum_g b_g SG_g(j), \quad (3.2)$$

где $SG_g(i)$ – количество референтных лиц для слоя спроса g в районе i (население, трудящиеся, рабочие места, рабочие места в сфере услуг, студенты, учебные места); a_g , b_g – нормирующие коэффициенты.

Понятие слоя спроса тождественно понятию цели поездки (на учебу, домой, поездки по работе и т.д.).

Нормирующие коэффициенты рассчитываются для каждого слоя спроса следующим образом: для каждого слоя спроса задается количество референтных лиц создания – Источник и количество референтных лиц притяжения – Цель (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Источники и цели по слоям спроса

Слои спроса	Источник ($РЛ_{созд}$)	Цель ($РЛ_{прит}$)
Дом – Работа	Трудящееся население	Места приложения труда
Работа – Дом	Места приложения труда	Трудящееся население
Дом – Прочее	Трудящееся население	Места приложения труда в сфере услуг
Прочее – Дом	Места приложения труда в сфере услуг	Трудящееся население
Работа – Прочее	Места приложения труда	Места приложения труда в сфере услуг
Прочее – Работа	Места приложения труда в сфере услуг	Места приложения труда
Работа – Работа	Места приложения труда	Места приложения труда
Прочее – Прочее	Места приложения труда в сфере услуг	Места приложения труда в сфере услуг
Дом – Учеба	Студенты	Учебные места
Учеба – Дом	Учебные места	Студенты
Работа – Учеба	Места приложения труда	Учебные места
Учеба – Работа	Учебные места	Места приложения труда
Учеба – Прочее	Учебные места	Места приложения труда в сфере услуг
Прочее – Учеба	Места приложения труда в сфере услуг	Учебные места
Учеба – Учеба	Учебные места	Учебные места

Алгоритм расчета

Общее количество перемещений рассчитывается следующим образом:

$$\sum_i Q_i = \sum_j Z_j = k \cdot N + B, \quad (3.3)$$

где k – коэффициент пересадочности пассажиров ОТ; N – количество проданных билетов ОТ; B – общее количество корреспонденций ИТ, восстановленное по интенсивностям движения на УДС.

Из опросов населения, которые проводятся в масштабах крупных проектов, определяют количество перемещений по слоям спроса. Обозначим эту величину как F_g .

Тогда нормирующие коэффициенты рассчитываются следующим образом:

$$a_g = \frac{F_g}{PL_{созд}}; \quad (3.4)$$

$$b_g = \frac{F_g}{PL_{при}}. \quad (3.5)$$

Когда определен объем движения для каждого района по соотношениям (3.1), (3.2), необходимо распределить спрос, т.е. на основании объемов сгенерированного спроса и матриц затрат на совершение корреспонденций построить матрицы корреспонденций для каждого слоя спроса.

3.1.2. Распределение транспортного спроса

На этапе распределения транспортного спроса определяются величины корреспонденций различных слоев спроса между транспортными районами, на которые разбита моделируемая территория.

Система транспортного районирования в транспортной модели города Перми состоит из 384 районов. В качестве районов выступают условно обособленные территориальные образования, подобранные с учетом сравнительной идентичности в плане социальных и экономических показателей внутри данных районов.

Схема алгоритма распределения транспортного спроса отображена на рис. 3.2.



Рис. 3.2. Этапы распределения спроса

Исходными данными для решения задачи распределения спроса являются матрицы затрат, потоки источника/цели (истоки/стоки) для районов по слоям спроса, а также необходимое для калибровки модели транспортного спроса среднее время поездки.

Подход к расчету матриц корреспонденций, реализованный в модели, основан на эквифинальности [13, 14] трех основных теоретических концепций, используемых для обоснования методов моделирования распределения транспортного спроса:

- Гравитационного подхода;
- Энтропийного подхода;
- Байесовского подхода.

Эквифинальность означает, что три указанных подхода приводят к одному и тому же практическому итерационному методу расчета элементов матрицы корреспонденций.

Для решения задачи распределения спроса формируется функция предпочтения, которая используется для расчета показателей затрат на осуществление поездки из района i в район j :

$$P_{ij} = e^{\frac{c(U_{ij}^b - 1)}{b}}, \quad (3.6)$$

где P_{ij} – вероятность совершения корреспонденции из района i в район j ; U_{ij} – затраты на совершение корреспонденции из района i в район j , мин.; b , c – коэффициенты, которые являются постоянными и определяются при калибровке модели.

На начальном этапе моделирования коэффициенты b и c принимаются исходя из опыта построения моделей транспортного спроса других городов. Также возможно уточнение вида функции предпочтения на основании результатов опросов населения.

Для получения матрицы корреспонденций (МК) по слоям спроса необходимо решить задачу максимизации функции для каждого слоя спроса

$$\sum_{i,j=1}^n F_{ij} \ln(P_{ij}/F_{ij}) \rightarrow \max, \quad (3.7)$$

при следующих ограничениях:

$$\sum_{j=1}^n F_{ij} = Q_i \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^n F_{ij} = Z_j$$

Решением задачи максимизации является:

$$F_{ij} = k \cdot Q_i \cdot Z_j \cdot P_{ij}(U_{ij}) = k \cdot Q_i \cdot Z_j \cdot e^{\frac{c(U_{ij}^b - 1)}{b}}, \quad (3.9)$$

где F_{ij} – количество корреспонденций из района i в район j ; P_{ij} – функция предпочтения, определяет отношения участника движения к затратам на передвижение.

Функции предпочтения используются для пересчета показателей затрат на осуществление поездки из района i в район j в оценки субъективных вероятностей совершения перемещения:

$$P(U_{ij}) = P(C | A_i \cap B_j).$$

Здесь C – событие, состоящее в том, что перемещение будет совершено; A_i – означает, что источник перемещения находится в источнике i ; B_j – что оно имеет целью район j .

Любая функция предпочтения f должна обладать следующими свойствами:

1. Определена для всех неотрицательных значений аргумента и принимает неотрицательные значения.

2. Монотонно убывает (или, по крайней мере, не возрастает) на всей области определения.

3. Удовлетворяет краевым условиям:

$$P(0) = 1, \quad \lim_{U_{ij} \rightarrow \infty} P(U_{ij}) \rightarrow 0$$

В транспортных моделях городов часто используется функция предпочтения Вох-Сох (названа в честь ученых George Voh и David Cox) вида

$$P(U) = e^{-\frac{c(U^b - 1)}{b}}, \quad (3.10)$$

где U – затраты на совершение корреспонденции, мин.; $P(U)$ – вероятность совершения корреспонденции с затратами U ; b , c – коэффициенты.

График функции предпочтения типа Вох-Сох представлен на рис. 3.3. По горизонтальной оси откладывается время, затрачиваемое на совершение транспортной корреспонденции, по вертикальной оси – вероятность совершения такой корреспонденции.

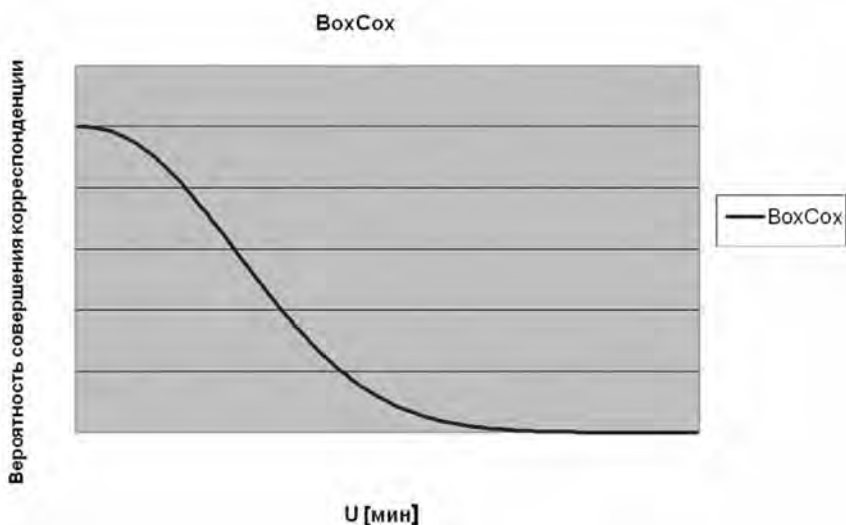


Рис. 3.3. График функции предпочтения вида Вох-Сох

Модель транспортного поведения людей, основу которой составляет функция предпочтения Вох-Сох, имеет два независимых параметра – коэффициенты функции c и b .

Для города Перми значения этих параметров составляют $c = -0,004$ и $b = 1,81375$. Эти значения были также соотнесены с результатами опросов населения города Перми о дальности и среднем времени совершения транспортных корреспонденций. Каждый из этих коэффициентов может быть представлен, как некоторая функция от параметров эллипсовидной модели города [18], с двумя параметрами – суммой длин полуосей эллипса и их отношением.

Для города Перми эллипс 90% вероятности нормального распределения для жилых зданий с учетом жителей примет вид, изображенный на рис. 3.4 (внутренний темно-серый эллипс).

Параметры эллипса, описывающего распределение жилых зданий, следующие:

Центр эллипса находится в точке: $(-1172,616; -380,2037)$. Система координат – городская, плоская.

Угол поворота эллипса между осью ОХ и большей полуосью эллип-

$$\text{са } b: \phi = \frac{4\pi}{21}.$$

Полуоси эллипса: $a = 11117; b = 17095$;

Расстояние между фокусами: $c = 12986$.

Для жилых зданий, расположенных на территории города Перми, с учетом их площадей, параметры эллипса равны (внешний темно-серый эллипс, рис. 3.4):

Центр эллипса находится в точке: $(1158,8068; 1700,2714)$.

Угол поворота эллипса между осью ОХ и большей полуосью эллип-

$$\text{са } b: \phi = \frac{20\pi}{77}, \text{ полуоси эллипса: } a = 15479; b = 23192;$$

Расстояние между фокусами: $c = 17271$.

Распределение автотранспортных средств, принадлежащих гражданам и зарегистрированных на территории города Перми, описывает эллипс, имеющий следующие параметры (светло-серый эллипс, рис. 3.4).

Центр эллипса находится в точке: $(-927,2094; -478,1996)$;

Угол поворота эллипса между осью ОХ и большей полуосью эллип-

$$\text{са } b: \phi = \frac{20\pi}{101}.$$

Полуоси эллипса: $a = 11628; b = 17429$;

Расстояние между фокусами: $c = 12983$.

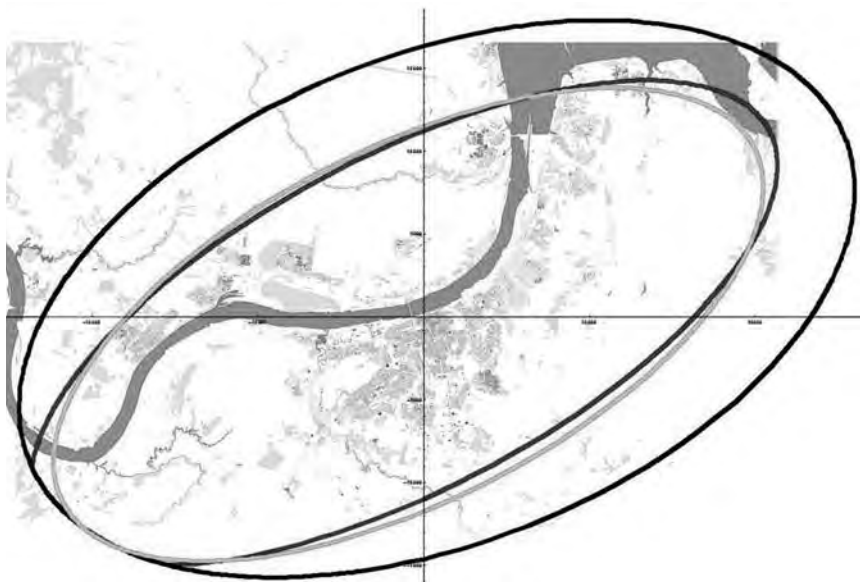


Рис. 3.4. Территория города Перми и геометрическое представление области распределения различных элементов городской структуры

Более подробно алгоритм построения эллипсов описан в [18].

Зависимость параметров b и c функции Вох-Сох с параметрами эллипса имеет вид:

$$b = k_1(a_{эл} + b_{эл}), \quad (3.11)$$

$$c = k_2 \frac{a_{эл}}{b_{эл}}, \quad (3.12)$$

где b , c – параметры функции Вох-Сох; $a_{эл}$ – малая полуось эллипса; $b_{эл}$ – большая полуось эллипса; k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности.

С учетом полученных в главе 2 значений параметров эллипса значения коэффициентов k_1 и k_2 равны: $k_1 = 0,00006429$, $k_2 = -0,00615094$.

Используя полученные таким образом значения коэффициентов пропорциональности k_1 и k_2 , рассчитаем параметры функции предпочтения для города Екатеринбурга. Функция предпочтения для осуществления транспортных корреспонденций жителями города Екатеринбурга будет иметь вид:

$$P(U) = e^{\frac{c(U^b - 1)}{b}}, \quad (3.13)$$

где $b = 1,5997$; $c = -0,00483$.

Полученные таким способом параметры для функции предпочтения, используемой в последующем для построения модели транспортного спроса города Екатеринбург, показали свою адекватность при последующем анализе качества транспортной модели этого города.

Модель Вох-Сох хорошо подходит для целей совершенствования алгоритма поиска закономерностей распределения транспортного спроса. Такая модель будет работать при построении матриц грузовых и пассажирских корреспонденций по всем слоям спроса. Причем подобная зависимость справедлива при построении любой (по видам перемещений) матрицы корреспонденций.

При решении задачи математического программирования с использованием метода балансировки при построении модели транспортного спроса используются коэффициенты функции Вох-Сох. В результате определяются объемы транспортных корреспонденций для каждой пары транспортных районов по всем

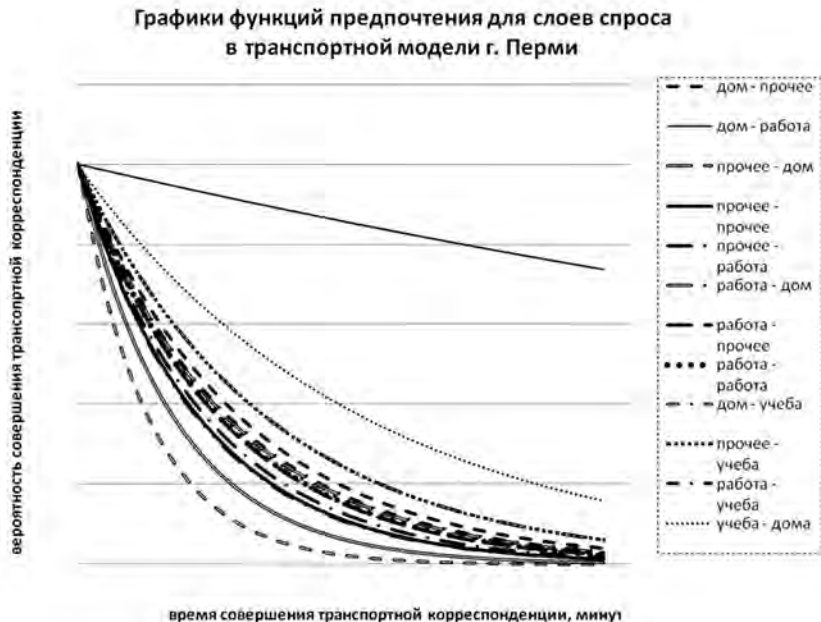


Рис. 3.5. Графики функций предпочтения для слоев спроса в транспортной модели города Перми



Рис. 3.6. Фрагмент итерационной процедуры алгоритма метода балансировки

сегментам спроса. В каждом сегменте спроса формируется своя матрица корреспонденций.

Для транспортной модели города Перми значения коэффициентов для слоя спроса Дом – Прочее равны $b = 1$, $c = -0,0342$, для слоя спроса Работа – Прочее $b = 1$, $c = -0,03933$.

Графики функций предпочтения для транспортной модели города Перми приведены на рис. 3.5.

Поставленная задача математического программирования по нахождению элементов матриц корреспонденций F_{ij} решается методом балансировки при введении промежуточных переменных α и β . Фрагмент циклической части вычислительного алгоритма метода балансировки представлен на рис. 3.6.

На практике при построении моделей транспортного спроса в городах чаще используют полуаналитические методы расчета спроса на транспортные передвижения.

Города со сложившейся в течение многих лет после появления городского транспорта транспортной инфраструктурой могут предоставить исследователю значительную информацию о сложившихся транспортных корреспонденциях в этом городе. Поэтому необходимо

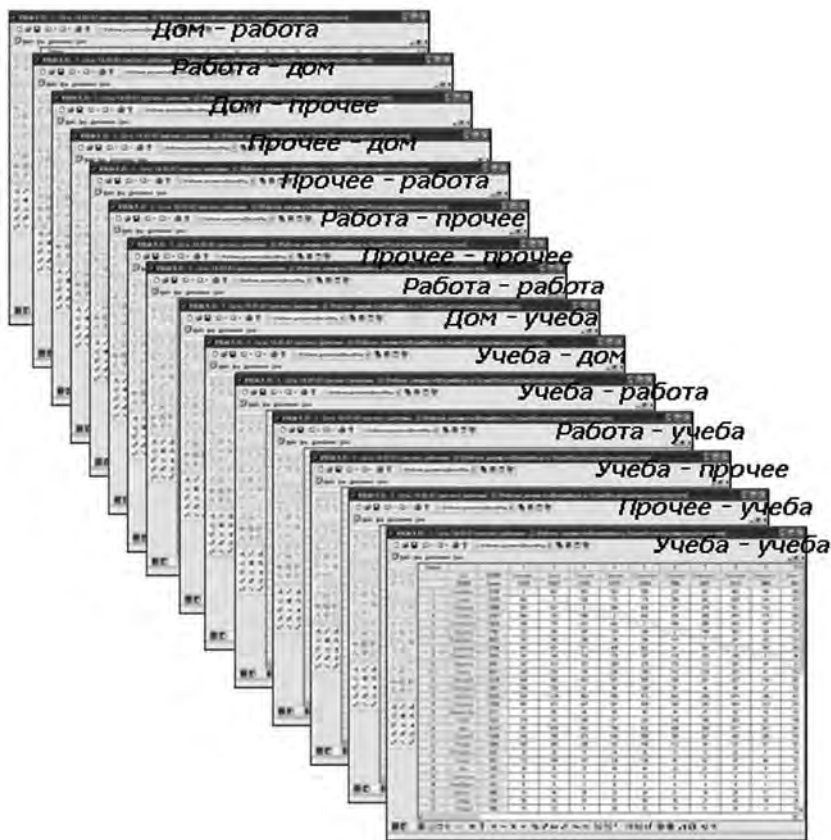


Рис. 3.8. Полученный необходимый набор матриц корреспонденций на индивидуальном транспорте для города Перми

3.1.3. Выбор режима

После получения матриц корреспонденций по слоям спроса, необходимо разделить эти матрицы по режимам движения. Этот этап иногда называют – расщепление [19]. Режим движения будет определять способ реализации корреспонденции – на ИТ или на ОТ.

Схема этапов выбора режима приведена на рис. 3.9.

Для решения задачи выбора режима строится функция предпочтения для выбора режима, основанная на критериях следующего вида:

$$P_{ijИТ} = e^{\frac{c(U_{ijИТ}^b - 1)}{b}}, \quad P_{ijОТ} = e^{\frac{c(U_{ijОТ}^b - 1)}{b}}, \quad (3.14)$$



Рис. 3.9. Этапы выбора режима

$$U_{ijИТ} = k_1 \cdot t_{ijИТ}, \quad U_{ijОТ} = k_2 \cdot t_{ijОТ}, \quad (3.15)$$

где $P_{ijИТ}$ – вероятность совершения корреспонденций из района i в район j на ИТ; $P_{ijОТ}$ – вероятность совершения корреспонденций из района i в район j на ОТ; $U_{ijИТ}$ – суммарные затраты на корреспонденции из района i в район j на ИТ, мин.; $U_{ijОТ}$ – суммарные затраты на корреспонденции из района i в район j на ОТ, мин.; k_1, k_2 – коэффициенты, значения которых уточняются при калибровке модели.

Матрицы корреспонденций из района i в район j режимом m для слоя спроса k будут рассчитываться по следующему соотношению:

$$F_{ijkm} = L_{ijkm} \cdot F_{ijk} \quad (3.16)$$

где F_{ijkm} – матрица корреспонденций из района i в район j слоя спроса k режимом m ; F_{ijk} – матрица корреспонденций из района i в район j слоя спроса k ; L_{ijkm} – коэффициент, характеризующий вероятность выбора режима m при совершении корреспонденций из района i в район j слоя спроса k .

Коэффициент L_{ijkm} рассчитывается как:

$$L_{ijkm} = \frac{P_{ijkm}}{\sum_m P_{ijkm}} = \frac{e^{\frac{c(U_{ijkm}^b - 1)}{b}}}{\sum_m e^{\frac{c(U_{ijkm}^b - 1)}{b}}},$$

$$L_{ijkm} \in (0; 1). \quad (3.17)$$

Так, если мы рассматриваем только два режима: ИТ и ОТ, коэффициент L_{ijkm} будет равен:

$$L_{ijkИТ} = \frac{P_{ijkИТ}}{P_{ijkИТ} + P_{ijkОТ}} = \frac{e^{\frac{c(U_{ijkИТ}^b - 1)}{b}}}{e^{\frac{c(U_{ijkИТ}^b - 1)}{b}} + e^{\frac{c(U_{ijkОТ}^b - 1)}{b}}}, \quad (3.18)$$

$$L_{ijkОТ} = \frac{P_{ijkОТ}}{P_{ijkИТ} + P_{ijkОТ}} = \frac{e^{\frac{c(U_{ijkОТ}^b - 1)}{b}}}{e^{\frac{c(U_{ijkИТ}^b - 1)}{b}} + e^{\frac{c(U_{ijkОТ}^b - 1)}{b}}}. \quad (3.19)$$

При изменении затрат ΔU_{ijm} (ΔU_{ij1} – изменения затрат для ИТ, ΔU_{ij2} – изменения для затрат для ОТ) при расчете какого-либо сценария, меняется значение коэффициента L_{ijm} :

$$L_{ijkm} = \frac{P_{ijkm} + \Delta P_{ijkm}}{\sum_m (P_{ijkm} + \Delta P_{ijkm})} = \frac{e^{\frac{c((U_{ijkm} + \Delta U_{ijkm})^b - 1)}{b}}}{\sum_m e^{\frac{c((U_{ijkm} + \Delta U_{ijkm})^b - 1)}{b}}} =$$

$$= \frac{e^{\frac{c((U_{ijkm} + \Delta U_{ijkm})^b - 1)}{b}}}{e^{\frac{c((U_{ijk1} + \Delta U_{ijk1})^b - 1)}{b}} + e^{\frac{c((U_{ijk2} + \Delta U_{ijk2})^b - 1)}{b}}}. \quad (3.20)$$

Так как пределы изменения значений коэффициента L_{ijm} остаются те же, общее количество корреспонденций не изменится.

3.1.4. Перераспределение транспортного спроса

После того как получены матрицы корреспонденций по слоям спроса, и они разделены на виды транспорта, которыми будут реализованы, необходимо провести перераспределение полученных матриц корреспонденций по транспортному предложению для выбора того или иного пути реализации этих корреспонденций.

Перераспределение – это один из основных методов определения и анализа транспортного предложения. В сложившейся мировой практике существует так называемый принцип равновесных потоков («user equilibrium model»). Из этого принципа следует: затраты времени на поездку зависят от величин транспортных потоков на элементах УДС, следовательно, водители выбирают маршруты движения с учетом этих затрат.

Данный подход позволяет комплексно оценить все особенности существующей транспортной сети, а также учесть задержки в движении, связанные с уровнем существующей загрузки элементов УДС.

Перераспределение помогает рассчитывать:

- нагрузку объектов сети;
- параметры для оценки качества соединения между транспортными районами.

При перераспределении моделируются пассажирские поездки. Пользователь ИТ выбирает маршрут, т.е. серию отрезков, которые оказываются наиболее удобными. Пассажир ОТ не выбирает маршрут для своей поездки, он выбирает время отправления по расписанию, т.е. таким образом он ищет возможность достижения цели поездки.

Процедура перераспределения основывается на поиске алгоритмов, которые определяют маршруты или соединения между источником и целью. Поиск процедуры следует за выбором процедуры, который распределяет спрос отношений источник–цель на маршруты/соединения. Маршруты/соединения несут необходимую информацию для расчета параметров, таких как время, расстояние и число пересадок.

Перераспределение происходит исходя из временных выгод или выгод в пробеге автомобиля или времени поездки в общественном транспорте. Чем короче и менее нагружен путь между двумя районами, тем больше вероятность того, что по нему поедут автомобили при реализации своих транспортных потребностей.

3.1.4.1. Перераспределение индивидуального транспорта

Алгоритм перераспределения матриц корреспонденций по транспортному предложению для индивидуального транспорта схематично отображен на рис. 3.10.

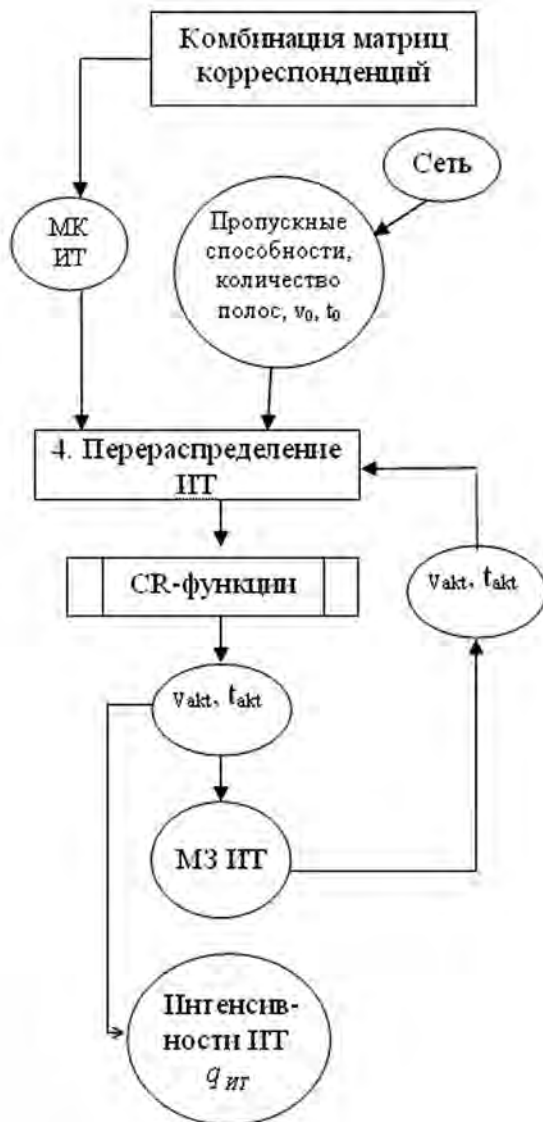


Рис. 3.10. Этапы распределения матриц корреспонденций по транспортному предложению для индивидуального транспорта

При перераспределении транспортных потоков по сети учитываются такие факторы, как: ширина проезжей части, наличие светофорного регулирования и его режимы, наличие одностороннего движения, наличие запретов на проезд грузового транспорта по участкам УДС,

наличие запретов маневров на перекрестках, наличие парковок, оказывающих влияние на условия движения транспорта.

При осуществлении прогноза интенсивности (с математической точки зрения) необходимо минимизировать интегральный функционал специального вида при наличии ограничений.

Для перераспределения индивидуального транспорта в транспортной модели города Перми была использована обучающая процедура, разработанная профессором Д. Лозе (Дрезденский технический университет) [20].

Существуют некоторые особенности алгоритма перераспределения транспортных потоков на улично-дорожной сети:

1) На практике необходимо использовать специальный двухуровневый граф сети, построенный с учетом организации движения на перекрестках.

Граф верхнего уровня будет связывать участки сети от одной стоп-линии до другой, а граф второго уровня – стоп-линии в пределах одного перекрестка. Такая организация графа позволяет наиболее точно отобразить особенности системы организации дорожного движения.

2) Необходимо использовать наиболее точный и максимально корректный алгоритм учета задержек транспорта и скоростей движения по элементам улично-дорожной сети.

В транспортной модели для каждой дуги предусмотрено автоматическое формирование индивидуальной функции затрат с учетом наличия перегонов – сечений, обуславливающих задержку транспортного потока, а также с учетом интенсивности движения нерельсового общественного транспорта и состояния дорожного покрытия.

В современных программных продуктах для моделирования транспортных потоков индивидуального транспорта реализовано множество процедур, позволяющих прогнозировать перераспределение потоков индивидуального транспорта на графе УДС города. При этом существуют как процедуры без определенного моделирования времени, так и процедуры, которые работают на основе динамической модели, т.е. с учетом изменения параметров по времени. Фундаментальные принципы процедур перераспределения транспортных потоков рассмотрены в [21].

Наиболее часто используют три процедуры расчета перераспределения транспортного спроса:

1. *Процедура последовательного перераспределения* – делит матрицу корреспонденций в процентном отношении на несколько частичных матриц. Корреспонденции частичных матриц постепенно перераспределяются на сеть. При этом для поиска путей учитывается сопротивление, которое выводится из нагрузки предыдущего шага.

2. *Процедура равновесного перераспределения* – разделяет спрос в соответствии первому принципу Вардроп: «Каждый отдельный участник транспортного движения выбирает свой маршрут так, что продолжительность поездки на всех альтернативных путях в конечном счете равна и каждая смена на другой путь увеличила бы личное время в пути». Исходя из последовательного перераспределения потоков как начального решения создается равновесное состояние в многоступенчатой итерации. Во внутреннем шаге итерации пути одной корреспонденции перемещением транспортных средств приводятся в равновесие. В наружной итерации проверяется, есть ли при новом актуальном состоянии сети новые пути с меньшим сопротивлением.

3. *Обучающая процедура* – отображает «учебный процесс» участников транспортного движения во время перемещения по сети. Исходя из принципа «всё или ничего», водители учитывают информацию последней поездки для нового поиска путей.

Обучающая процедура представляет собой модель процесса адаптации участников автомобильного движения во время перемещения по сети. На каждой следующей итерации водители учитывают информацию последней поездки для нового поиска путей.

При этом сопротивление для поиска путей является функцией от сопротивления при фактической интенсивности движения и из сопротивления, рассчитанного на предыдущей итерации по следующей адаптивной формуле:

$$\hat{R}(n) = \hat{R}(n-1) + \Delta(n)[R(n) \times \hat{R}(n-10)] \quad (3.21)$$

Параметр адаптации $\Delta(n)$ определяется как

$$\Delta(n) = 0,15 + \frac{0,35}{(1 + \delta(n))^{\square(\delta(n))}}, \quad (3.22)$$

$$\square[\delta(n)] = \frac{2,5}{1 + \exp[4 \times 0,02 \Delta \delta(n)]}, \quad (3.23)$$

$\delta(n)$ – модуль процентного отклонения фактического сопротивления пути от расчетного:

$$\delta(n) = \left| \frac{R(n) - \hat{R}(n-1)}{\hat{R}(n-1)} \right|. \quad (3.24)$$



Рис. 3.11. Схема работы обучающей процедуры перераспределения транспортного спроса Д. Лозе [20]

Численные параметры, входящие в данные формулы, были определены в ходе калибровки модели. Схема обучающей процедуры приведена на рис. 3.11.

3.1.4.2. Перераспределение общественного транспорта

Для общественного транспорта использовалась процедура перераспределения по расписанию рис. 3.12.



Рис. 3.12. Этапы распределения матриц корреспонденций по транспортному предложению для общественного транспорта

Основная идея данной процедуры состоит в том, что при определении нагрузки ОТ принимают во внимание все отдельные маршруты и расписание движения по ним. При этом учитывается не только время в пути для каждого варианта маршрута, но и время пересадок, а также время пути пешком от центра тяжести района-источника до остановки и от остановки до центра тяжести района-цели.

Оценка вероятности выбора пути осуществляется с помощью следующей оценочной функции:

$$P(R) = \exp\left[-16\left(\frac{R}{R_{\min}} - 1\right)^2\right], \quad (3.25)$$

R – сопротивление конкретного пути следования, $R_{\min}$ – минимальное сопротивление из всех соединений.

Заключительный этап разработки транспортных моделей сводится к совершенствованию и адаптации основных определяющих соотношений, характеризующих закономерности перераспределения транспортного спроса с учетом действующего транспортного предложения применительно к местным условиям. Этот этап называется калибровкой модели.

3.2. Модели транспортной подвижности населения. Определение объема внешних трудовых корреспонденций

3.2.1. Определение среднегодовых объемов внешних трудовых корреспонденций по натурным данным

Необходимым этапом при построении модели транспортного спроса является учет транспортных корреспонденций, осуществляемых на границах области моделирования. Для крупных городов – на въездах и выездах из города.

С этими целями необходимо определение объема ежедневно въезжающих в город трудящихся и выезжающих из него людей с целью осуществления своих трудовых корреспонденций. Эти исследования основываются на анализе данных натурных обследований объемов движения на границах (кордонах) исследуемой территории.

Восстановление объема транспортных корреспонденций с кордонов (территорий за границами области моделирования) покажем на примере города Перми, на основе данных натурных замеров, проведенных в апреле 2009 года.

Общий объем транспортных корреспонденций, совершаемых на легковых автомобилях (ЛА) по направлению в город, составляет 32 500 ТС. Наполненность ЛА на въездах в город составляет 1,96 чел./ТС.

Кривые суточной неравномерности транспортных потоков, представленные на рис. 3.13 и 3.14, построены для кордонов на Краснокамском направлении и направлении на Лобаново.

Проведенные на этих кордонах замеры наиболее четко отображают картину суточной неравномерности на въездах и выездах из города. На приведенных рисунках видны выраженные пиковые интенсивности в утреннее и вечернее время, что соответствует периодам деловой активности населения.

Принято допущение, что в первую половину дня люди въезжают в город на работу, а во вторую половину – въезжают в город уже с работы. Просуммировали количество автомобилей в первой половине



Рис. 3.13. Въезд в город с кордона Краснокамск

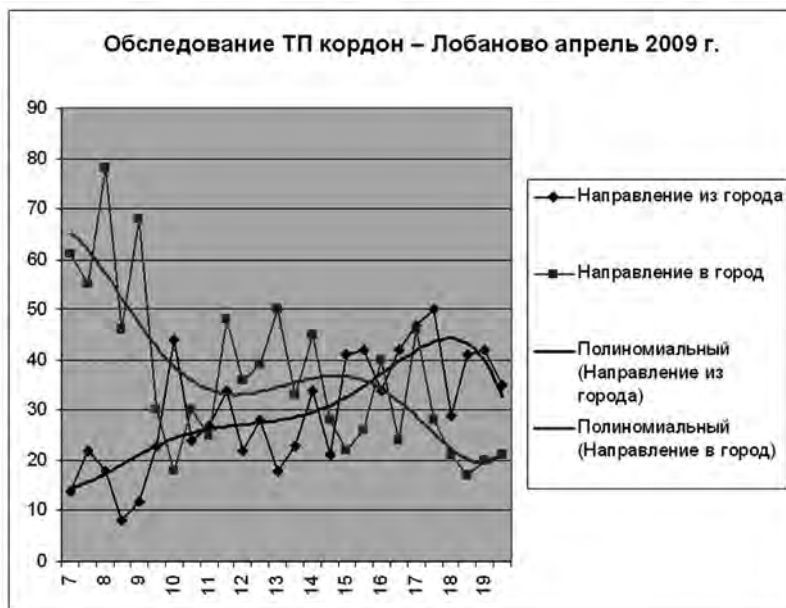


Рис. 3.14. Въезд в город с кордона Лобаново

дня, соотносили с общим дневным потоком, число их составило 59,2%. Аналогично для второй половины дня – 40,8%.

По результатам этого в дальнейшем приняли, что 59,2% от общего объема въезжающих людей – это трудящиеся, которые едут на работу в город, и 40,8% – это возвращаются с работы городские жители.

Общий наблюдаемый объем корреспонденций на границе города составил 63 700 человек, перемещающихся на легковых автомобилях.

Из них 37 710 человек приезжают работать в город, и 25 990 человек выезжают из города на работу.

Объем пассажироперевозок на общественном транспорте (автобусе) составляет 15 000 человек в одном направлении. В дальнейшем примем, что весь этот объем составляют трудящихся, которые едут в город на работу. Принято допущение, что на работу за город жители перемещаются только с использованием личного транспорта. И, следовательно, все, кто использует общественный транспорт для передвижения за границу города, – это жители кордонов, которые едут на заработки в город.

Дополнительный объем въезжающих в город людей на электропоездах составляет 4630 пассажиров.

В табл. 3.2 представлен объем трудящихся, приезжающих с кордонов. Данные получены на основе натурных наблюдений.

Таблица 3.2

Объем трудящихся с кордонов, определенный по результатам натурных наблюдений

Количество работников, приезжающих в город с кордонов в сутки	57 500 чел.
Количество жителей города Перми, выезжающих работать за кордоны в сутки	26 000 чел.

Заключительные выводы, полученные на основе сравнительного анализа (распределение мест приложения труда по городу Перми):

1. Количество трудящихся в городе Перми составляет 591 150 человек, из них 26 000 человек едут работать за город. В то же время в город приезжают работать 57 500 человек, следовательно:

$591\,150 - 26\,000 + 57\,500 = 622\,650$ человек трудящегося населения ежедневно находятся в городе на рабочем месте.

Следовательно, в городе должно находиться минимум 622 650 рабочих мест.

2. Учитывая данные Пенсионного фонда о количестве рабочих мест в городе Перми и данные, полученные из натурных расчетов, предлагается придерживаться объема рабочих мест в городе порядка 625 000.

Окончательно объем рабочих мест в городе Перми был принят равным 625 000. В дальнейшем была проверена и уточнена разность рабочих мест по отдельным транспортным районам. В результате работы с предложенными материалами изменились границы некоторых транспортных районов, добавились новые районы, которые территориально захватывают промышленные территории.

3.2.2. Восстановление матрицы корреспонденций для внешних трудовых корреспонденций

После уточнения объемов внешних корреспонденций проводится распределение данного объема в матрицу корреспонденций. Подробное описание данной методики можно прочесть в статьях доктора К. Шиллера [22, 23].

Расчет каждой ячейки матрицы корреспонденций осуществляется по формуле:

$$x_{ij} = \frac{e^{-\gamma \cdot t_{ij}} \cdot E_i}{\sum_k e^{-\gamma \cdot t_{ik}} \cdot E_k} \cdot Z_j, \quad (3.26)$$

где x_{ij} – количество транспортных корреспонденций из района i в кордон j ; γ – коэффициент модели Logit; t_{ij} – время в пути между районом i и районом кордона j ; Z_j – входящий поток района кордона j , известен из обследований; E_i – население i -го района области исследования.

Раздел 4

Моделирование транспортного предложения

Транспортная модель города содержит в себе весь набор действующих в городе систем транспорта. Чаще всего в этот набор входит автомобильный транспорт, железнодорожный транспорт (наземный, подземный и надземный) и водный транспорт.

Наиболее сложным является создание модели функционирования автомобильного транспорта в транспортной системе города.

Информационная база данных представляет собой аналог предоставления структурированной графической базы данных в ГИС. Вся информация состоит из набора графических элементов и их атрибутов. В первую очередь это касается инфраструктуры транспорта.

К транспортному предложению также относятся остановки общественного транспорта (ОТ), маршруты ОТ и расписания, по которому осуществляется движение пассажиропотоков на ОТ.

4.1. Состав транспортного предложения

4.1.1. Транспортное предложение индивидуального транспорта

Автомобильный транспорт разного вида, назначения, собственности и формы доступа к его услугам чаще всего использует общую инфраструктуру – улично-дорожную сеть.

Транспортное предложение задается в виде узлов и перегонов для индивидуального транспорта. Для них должны быть заданы следующие характеристики:

- Узлы (вид регулирования, приоритет движения, разрешенные повороты, задержки);

• Перегоны (длина, v_0 , t_0 , пропускная способность, количество полос).

Состав элементов, представляющих информационную составляющую модели транспортного предложения функционирования автомобильного транспорта, представлен в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Элементы транспортного предложения

Элемент транспортного предложения	Описание элемента
Узлы	определяют положение перекрестков, являются начальными и конечными точками перегонов
Перегоны	описывают улицы, соединяют узлы, имеют направление, прямое и обратное направления являются самостоятельными объектами сети, которым присваивается общий номер отрезка
Повороты	описывают, в каких направлениях можно поворачивать на перекрестке
Районы	начальные и конечные пункты транспортного движения, в модели каждый район сведен к центру тяжести, границы показывают пространственное положение района, однако влияние на распределение транспорта оказывает только положение центра района
Примыкания	примыкание соответствует начальному и конечному пешеходному переходу, служит для связи центра транспортного района с УДС, для примыкания указывается время движения пешком для ОТ и время выезда из квартала для ИТ, каждый район имеет примыкание минимум с одним узлом сети,

Граф улично-дорожной сети города Перми, реализующий в модели транспортное предложение, включает в себя все городские улицы и дороги. Граф сети ориентирован по направлениям, состоит из дуг и узлов.

Размер транспортного предложения для разных транспортных моделей приведен в табл. 4.2.

Кроме информационной основы модель транспортного предложения содержит некий набор определяющих соотношений, описывающих основные процессы взаимодействия транспортной инфраструктуры и транспортных средств.

Таблица 4.2

Размер транспортного предложения для разных моделей

Элементы	Количество элементов			
	Пермь	Пермский край	Екатеринбург	Самара
Узлы	5224	6525	3756	14065
Отрезки	11784	14610	8732	32234
Транспортные районы	387	328	339	294
Примыкания	4468	1026	2252	12340

Основу этих соотношений составляют функции сопротивления, или функции затрат.

4.1.2. Транспортное предложение общественного транспорта

Городской пассажирский транспорт общего пользования в транспортных моделях представляет собой единую систему, формально не разделяемую на транспортные средства и транспортную инфраструктуру.

Это существенно упрощает процесс создания модели транспортного спроса, однако такой подход требует принятия ряда допущений.

При моделировании городского пассажирского транспорта общего пользования в качестве допущений принимаются следующие:

1. Движение подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования выполняется строго по расписанию.
2. Единицы подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования не взаимодействуют на сети друг с другом.
3. Каждая единица подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования имеет бесконечную вместимость.

Для системы городского пассажирского транспорта общего пользования транспортное предложение также состоит из узлов, отрезков, примыканий (точек доступа в системы), а кроме того появляются новые элементы: маршруты прохождения ОТ, остановки и расписания.

Необходимые элементы, описывающие функционирование городского пассажирского транспорта общего пользования (ГПТОП) и количественный состав элементов транспортного предложения для транспортных моделей городов Пермь, Екатеринбург, Самара и Пермского края, приведены в табл. 4.3.

Стоит отметить, что приведенные транспортные модели имеют примерно одинаковый уровень детализации.

Таблица 4.3

Элементы, описывающие функционирование ГПТОП, количественный состав элементов предложения для транспортных моделей городов Пермь, Екатеринбург, Самара и Пермского края

Элементы сети городского пассажирского транспорта	Элементы транспортного предложения	Количество элементов в транспортных моделях			
		Пермь	Пермский край	Екатеринбург	Самара
Транспортная инфраструктура маршрутной сети	Узлы	5224	4842	3756	14065
	Отрезки	11874	6964	8732	32234
	Остановки	464	543	520	455
	Зоны остановки	907	543	1097	1102
	Пункты остановки	931	543	1246	1214
Маршруты общественного транспорта	Маршруты	109	496	149	175
	Варианты маршрутов	218	938	298	349
Расписание движения маршрутных транспортных средств	Обслуживающие поездки	15437	2820	—	25803

Маршрутную сеть общественного транспорта можно представить в виде графа, фрагмент которого приведен на рис. 4.1. Граф включает в себя остановки, размер которых зависит от частоты обслуживания остановки (вершины графа), и маршрутов (ребра графов).

Такое схематическое изображение маршрутной сети позволяет визуально оценить связность маршрутной сети, а также степень дублирования маршрутами друг друга.

В транспортной модели используется иерархия: пункты остановок – зоны остановок – остановка (рис. 4.2). Остановка – самая крупная единица, общий пересадочный пункт. Зона остановки объединяет несколько остановочных пунктов, время пересадки между которыми равно нулю. Пункт остановки – конкретное место остановки транспорта (остановочный павильон, остановочная площадка).

Редактировать остановку 5125

Номер: 5125
Код:
Имя: Попова (ул. Ленина)
Тип: 0

База ЗоныОст ПунктыОст ВрПешПерес ЗонОст Спец. ВрПеш пг. < >

	33555093	33555094	33555095	33555096	33555097
33555093	0s	1min	1min 10s	50s	50s
33555094	1min	0s	50s	1min	1min
33555095	1min 10s	50s	0s	50s	1min
33555096	50s	1min	50s	0s	1min
33555097	50s	1min 10s	1min	1min 10s	0s
33555098	1min	1min	50s	1min	1min

< >

ОТпешком Пешком ▾

OK Отмена

Рис. 4.3. Фрагмент матрицы времени пешеходной пересадки между зонами остановок

4.2. Транспортное предложение на различных этапах расчета прогнозной транспортной модели

4.2.1. Транспортное предложение на этапе распределения и выбора режима

В процедурах распределения и выбора режима транспортное предложение участвует как источник формирования матриц затрат. На основе сформированных матриц затрат определяются временные затраты на совершение корреспонденций из района в район.

4.2.1.1. Индивидуальный транспорт

Для моторизованного индивидуального транспорта (МИТ) значение времени в пути определяется исходя из загрузки отрезков и поворотов, которые результируются из существующей транспортной нагрузки на каждый элемент и пропускной способности этих объектов сети. Поэтому значения времени ИТ в пути колеблются, в отличие от

времени в пути ОТ. Они прогнозируются до начала поездки только с определенной вероятностью.

Время движения маршрута между двумя районами состоит из следующих составляющих:

- время входа и выхода в сеть (по примыканиям);
- время движения на отрезках;
- время поворота на узлах (перекрестках).

С учетом характеристик транспортного предложения строится матрица затрат (МЗ) для индивидуального транспорта (ИТ).

Введем следующее обозначение для матрицы корреспонденций ИТ:

$t_{ijИ}$ – затраты времени на совершение корреспонденции из района i в район j на ИТ. Значения $t_{ijИ}$ формируют матрицу затрат для ИТ.

4.2.1.2. Общественный транспорт

Затраты для общественного транспорта остаются постоянными, так как рассчитываются исходя из фиксированного расписания движения. Вводим следующее обозначение для матрицы корреспонденций ОТ:

$t_{ijО}$ – затраты времени на совершение корреспонденции из района i в район j на ОТ.

В общем виде затраты на совершение корреспонденции на ОТ будут иметь вид:

$$t_{ijО} = k_1 \cdot \text{ВВП}_{ij} + k_2 \cdot \text{цена_билета}, \quad (4.1)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты, ВВП – воспринимаемое время в пути, рассчитывается как:

$\text{ВВП} = 2 \times \text{время начала пешего подхода} + 2 \times \text{время ожидания} + \text{время поездки} + 2 \times \text{время конечного пешего подхода}$

Данное выражение для воспринимаемого времени в пути дает возможность менять важность того или иного слагаемого в оценке пассажиром своих затрат на передвижения. Расчет ВВП производится для каждого из возможных путей ОТ.

Так как существует большое количество путей с учетом пересадок, процедура поиска путей ОТ, включаемая в расчет матрицы затрат ОТ, – наиболее ресурсоемкая и затратная по времени процедура при проведении расчетов на транспортной модели.

4.2.1.3. Использование матриц затрат

Взвешенные затраты на совершение корреспонденций из района i в район j определяются соотношением:

$$U_{ij} = k_1 \cdot t_{ijИ} + k_2 \cdot t_{ijО}, \quad (4.2)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты, которые определяются при калибровке модели, задаются как константы.

При расчете выбора режима в качестве затрат для формирования матриц корреспонденций ИТ используется матрица затрат ИТ, в качестве затрат для нормирования матриц корреспонденций ОТ – матрица затрат ОТ.

4.2.2. Транспортное предложение на этапе перераспределения

4.2.2.1. Индивидуальный транспорт

На этапе перераспределения учитывается детализация транспортного предложения: конкретные характеристики и конфигурация каждого из элементов УДС. При перераспределении каждой из корреспонденций назначается один из возможных путей прохождения из района-источника в район-цель по существующей УДС. Оценка временных затрат каждого из путей осуществляется с помощью CR-функции.

CR-функция задается для каждого элемента сети. Она указывает зависимость времени прохождения элемента сети t_{akt} от нагрузки q и пропускной способности q_{max} , т.е. результат CR-функции – время прохождения элемента сети t_{akt} . CR-функцию можно задать для каждого типа узлов, отрезков и примыканий. При вычислении времени прохождения пути суммируются результаты CR-функции для каждого элемента пути:

$$R = t_{akt} = t_{akt_примык_источника} + \sum_i t_{akt_узла\ i} + \sum_j t_{akt_перегона\ j} + t_{akt_примык_цели}. \quad (4.3)$$

Для индивидуального транспорта в модели используется CR-функция BPR (от названия Bureau of Public Roads) вида:

$$t_{akt} = t_0 \left(1 + a \left(\frac{q}{q_{max} \cdot c} \right)^b \right), \quad (4.4)$$

где t_0 – время, затраченное на проезд элемента сети в пустой сети; t_{akt} – время, затраченное на проезд элемента сети в нагруженной сети; q – нагрузка на перегон, авт./сутки; q_{max} – пропускная способность, авт./сутки.

График функции BPR при различных значениях коэффициентов приведен на рис. 4.4.

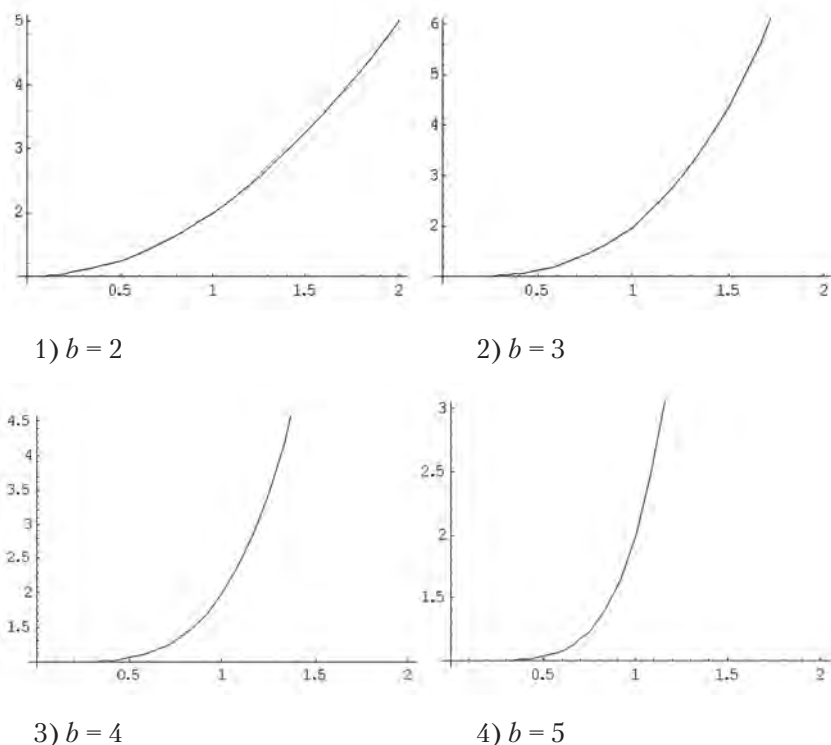


Рис. 4.4. Графики CR-функции BPR при $a = 1$ и $c = 1$, $t_0 = 1$ и различных значениях коэффициента b

По приведенным графикам видно, что при данных параметрах при достижении 100%-й нагрузки t_{akt} увеличивается в 2 раза. Степень CR-функции – (b) влияет на крутизну графика, т.е. на темп роста t_{akt} .

При изменении параметров a и c значение CR-функции также будет меняться.

В модели для перегонов была взята CR-функция BPR с коэффициентами $a = c = 1$ и $b = 2$. Для примыканий была выбрана функция BPR с коэффициентами $a = c = 1$ и $b = 3$.

Степень CR-функции BPR (коэффициент b) была выбрана больше, так как чем круче график CR-функции, тем точнее и адекватнее происходит разделение транспортного спроса района на примыканиях. Это связано с тем, что при разделении спроса по примыканиям в качестве пропускной способности примыкания задается соответствующая доля спроса из данного района. Соответственно, чем круче CR-функция, тем быстрее будут возрастать затраты на примыканиях при превышении данного объема, и будет происходить перераспределение потока на соседние примыкания.

При определении сопротивления при прохождении поворотов важно учитывать не только нагрузку самого поворачивающего потока, но и интенсивность конфликтующих потоков. Именно так происходит в реальной ситуации при прохождении саморегулируемых перекрестков.

Во многих исследованных прикладных программных продуктах, реализующих алгоритмы транспортных моделей, загрузка потока в рассматриваемом направлении поворота не влияет на время прохождения поворота. Это связано с тем, что в реальной ситуации помехи повороту создает встречный конфликтующий поток, т.е. время поворота должно зависеть от величины встречного (конфликтующего) потока.

Вследствие этого на этапе построения CR-функции было решено учесть влияние конфликтующих потоков при вычислении времени прохождения всего узла (т.е. не одного поворота, а всей их совокупности) в зависимости от типа регулирования узла.

Таким образом, время прохождения перекрестка в предлагаемом алгоритме транспортной модели складывается из времени прохождения узла, одинакового для всех направлений и меняющегося в зависимости от нагрузки в соответствии с CR-функцией, и времени, затрачиваемого непосредственно на осуществление маневра поворота, которое зависит от направления поворота и приоритетов движения (главный – второстепенный поток).

Классификация и основные параметры, используемые в прогнозных транспортных моделях функций затрат для маневров на перекрестках, полученные в результате проведенных «машинных» экспериментов имитации на микроуровневой модели (суммарные значения времени, затрачиваемого на проезд перекрестка в каждом направлении), приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Значения параметра t_0 для различных видов маневров на перекрестках

Узлы (по типу регулируе- вания)	t_0 , с	Повороты по направ- лению	По видам потоков из- и в-		t_0 , с
			из	в	
Регулируе- мые	15	направо	второстепенный	второстепенный	10
			второстепенный	главный	10
			главный	второстепенный	5
			главный	главный	5
		прямо	второстепенный	второстепенный	10
			второстепенный	главный	10
			главный	второстепенный	5
			главный	главный	5
		налево	второстепенный	второстепенный	20
			второстепенный	главный	20
			главный	второстепенный	15
			главный	главный	15
Нерегули- руемые	0	Повороты по направ- лению	По видам потоков из- и в-		
			из	в	
		направо	второстепенный	второстепенный	15
			второстепенный	главный	10
			главный	второстепенный	0
			главный	главный	0
		прямо	второстепенный	второстепенный	20
			второстепенный	главный	15
			главный	второстепенный	0
			главный	главный	0
		налево	второстепенный	второстепенный	20
			второстепенный	главный	20
			главный	второстепенный	10
			главный	главный	0

4.2.2.2. Общественный транспорт

При перераспределении общественного транспорта, аналогично ситуации с индивидуальным транспортом, каждой корреспонденции ОТ назначается свой путь в существующей маршрутной сети.

Набор возможных путей ОТ для перераспределения используется тот же, что при расчете матрицы затрат для ОТ. В качестве критерия для выбора пути используется инфраструктурное сопротивление, т.е. воспринимаемое время в пути.

Раздел 5

Особенности моделирования движения грузового транспорта

В прогнозной транспортной модели производится расчет пассажирских перемещений на индивидуальном и общественном транспорте. Это связано с тем, что в области моделирования движения индивидуального и общественного транспорта разработаны достаточно качественные математические модели.

Ввиду специфики грузового транспорта его движение данные модели описывают плохо. Основные факторы, определяющие специфику функционирования грузового транспорта в крупном городе и вместе с тем представляющие серьезные затруднения при формализации его функционирования, следующие:

- Источники и стоки (генераторы и потребители) грузовых транспортных потоков очень неравномерно расположены на территории города.
- В зависимости от типов перевозимых грузов формируемые подвижным составом транспортные потоки имеют существенные различия как по времени реализации корреспонденций в течение суток, так и по их объемам.
- Построение функций предпочтения для формирования спроса на грузовые перевозки скорее всего не имеет смысла, т.к. большая часть грузов распределена по потребителям непропорционально.
- Пути движения грузов по территории крупного города локализованы только на тех участках графа УДС, где разрешено движение грузового транспорта.

Основные проблемы, возникающие при моделировании грузового транспорта с помощью подходов, применяемых для индивидуального и общественного транспорта, имеют следующие причины:

– невозможно учесть холостые поездки грузовых автомобилей, которые, по различным оценкам, могут составлять от 15 до 50% от общего количества поездок;

– в обычном случае принимается допущение, что грузовые перевозки осуществляются по маятниковым маршрутам, хотя в реальности около 40% поездок грузовых автомобилей в городах осуществляется по кольцевым маршрутам;

– определить матрицы холостых поездок для кольцевых маршрутов на основе матриц грузовых корреспонденций не представляется возможным, поэтому определение матриц корреспонденций холостых поездок для маятниковых маршрутов осуществляется путем транспонирования матрицы груженых поездок;

– возникает необходимость сбора большого количества исходных данных о грузопотоках (грузоотправителях и грузополучателях), что является весьма дорогостоящим и трудозатратным мероприятием;

– используется усредненный коэффициент использования грузоподъемности для грузов различной номенклатуры. В случае ввода в модель разных коэффициентов использования грузоподъемности задача существенно затрудняется.

Таким образом, использовать методику прогнозирования интенсивностей движения грузовых автомобилей на основе грузовых корреспонденций целесообразно только для междугородних перевозок, осуществляемых преимущественно маятниковым способом. В городе же преобладают кольцевые маршруты движения грузового транспорта.

Тем не менее, можно предложить исследователям несколько вариантов моделирования движения грузового транспорта. Стоит отметить, что рассматриваемые варианты расчета дают не такие качественные результаты, как алгоритмы расчета функционирования пассажирского ИТ и ОТ. Возможны три способа учета в транспортной модели функционирования грузового транспорта:

1. Аналогично легковому транспорту. Нужно определить источники и цели для потока грузового транспорта (объем генерации грузов и объем потребления грузов в каждом транспортном районе). Далее выполняется стандартная 4-шаговая модель расчета.

Однако, как было отмечено выше, данный подход, в силу специфики грузового транспорта, дает слабые результаты. Прежде всего, проблема данного метода в сложности сбора исходных данных о грузоотправителях и грузополучателях, а также об объемах отправок и прибытий грузов.

2. На основе натуральных данных об интенсивностях движения грузового транспорта с помощью специального алгоритма восстанавливается матрица корреспонденций для грузового транспорта (методом максимального правдоподобия или аналогичными ему). Именно данный метод в настоящее время используется в транспортной модели го-

рода Перми. Недостаток данного метода – возможное несоответствие источников и целей грузовых корреспонденций.

3. На основе собранных натуральных данных по интенсивностям движения грузового транспорта с помощью введения дополнительной загрузки. В этом случае собранные значения интенсивности напрямую используются при выполнении процедуры перераспределения.

К объему (нагрузке) на каждый участок графа сети грузового транспорта прибавляются интенсивности индивидуального транспорта, получаемые при перераспределении матриц корреспонденций ИТ.

$$q_{\text{ИТ}} = k \cdot q_{\text{basic}} + q_{\text{ИТ_из_матрицы}} \cdot \quad (5.1)$$

По умолчанию первое слагаемое равно нулю, однако ему можно присвоить собранную на основе натуральных данных интенсивность грузового транспорта. Тогда интенсивность движения грузового транспорта будет участвовать в расчете значения функции сопротивления и может отображаться как отдельно, так и суммарно с индивидуальным транспортом (в приведенных единицах). В этом случае коэффициент k будет иметь значение коэффициента приведения.

Недостаток данного метода заключается в том, что значения интенсивности грузового транспорта окажутся действительными только для тех перекрестков и перегонов, на которых будет проведено обследование интенсивности движения грузового транспорта.

В настоящее время в большинстве действующих прогнозных транспортных моделей городов производится расчет движения грузового транспорта методом восстановления матрицы грузовых корреспонденций из данных натуральных замеров интенсивностей движения грузового транспорта.

Данный метод имеет свои плюсы и минусы, описанные выше. Тем не менее, именно такой подход рекомендуется в последнее время для практической реализации широким кругом специалистов.

Раздел 6

Особенности построения моделей пиковой загрузки

При решении локальных задач транспортного планирования часто требуется получить не только суточные данные о транспортном движении, но и пиковые данные, которые позволяют учесть неравномерность значений интенсивности транспортных потоков по направлениям в утренний и вечерний часы пик. Расчет пиковых моделей производится с помощью суточной модели:

Строится линейная комбинация рассчитанных суточных матриц корреспонденций, в результате получается суммарная матрица корреспонденций для часа пик.

$$F_{ij}^{пик} = \sum_m k_m F_{mij}, \quad (6.1)$$

где $F_{ij}^{пик}$ – пиковая матрица корреспонденций; F_{mij} – суточная матрица корреспонденций слоя спроса m ; k_m – коэффициент линейной комбинации для слоя спроса m .

Матрица корреспонденций строится как для утреннего, так и для вечернего часа пик. Коэффициенты для построения линейной комбинации рассчитываются на основе данных опросов населения.

Калибровка модели производится как по суточным данным об интенсивностях транспортных потоков, так и по пиковым.

При калибровке по пиковым интенсивностям было замечено, что разность натуральных и расчетных данных неравномерно распределена по территории города.

Причина этой неравномерности связана со способом расчета пикового транспортного спроса: при расчете используется одинаковая

кривая суточной неравномерности транспортного спроса для всех районов. При этом в реальности движение в периферийных районах начинается значительно раньше, чем в центре города.

С целью повышения адекватности транспортной модели в плане уточнения модели транспортного спроса по времени представляется целесообразным использовать разные кривые спроса для разных по взаимному расположению районов, а также удаленности этих районов от центра города. Однако в этом случае появляются различия в целях построения «пиковых» транспортных моделей города.

В зависимости от этих целей существуют разные пути реализации алгоритмов расчета пиковой модели:

1. «Пиковая» модель А – максимальные часовые нагрузки каждого участка УДС. Без разбиения на утро и вечер, это симметричные потоки в разных направлениях одного отрезка, равные какой-то доле от суточной интенсивности (например – 10% от суммарного суточного потока).

2. «Пиковая» модель В – максимальные часовые нагрузки каждого участка УДС в утренний и вечерний часы пик. Разные направления одного отрезка имеют разные значения интенсивности, однако они не соответствуют одному и тому же промежутку времени в реальности.

3. «Пиковая» модель С – нагрузки, соответствующие конкретному часу суток. Полностью соответствуют натурным потокам в заданный промежуток времени.

В настоящее время натурные данные пиковых интенсивностей, по которым происходит калибровка модели, соответствуют третьей цели построения модели – это данные об интенсивностях с 8-30 до 9-30 утра и с 18-00 до 19-00 вечера.

Вместе с тем, при расчете спроса в час пик используется подход, соответствующий второй цели. Кривые спроса строятся на основе выборки корреспонденций (из базы данных опросов населения) по каждому слою спроса в утренний и вечерний часы пик, которые затем суммируются независимо от территории.

Таким образом, в описываемой транспортной модели движение транспортных потоков в периферийных и центральных районах города начинается одновременно. Для достижения большей достоверности результатов расчета построение суточных кривых спроса стоит производить с учетом того, что жители отдаленных районов начинают движение раньше, чем жители центральных районов.

Соответственно, предлагается разбить территорию на несколько типов, каждому из которых в соответствие ставится своя кривая спроса. Далее требуется отнести каждый транспортный район к определенному типу (кривой спроса) и провести по каждому типу свою выборку, чтобы построить для районов каждого типа свою комбинацию матриц (слоев спроса).

Предлагается использовать следующие типы зон, назначение и классификация которых подробно приведена ниже:

1. Центральная зона.
2. Прилегающие к центру зоны.
3. Удаленные зоны (автономные территории).
4. Периферийные зоны (автомагистрали, являющиеся продолжением внешних дорог).

Соответственно, начало движения будет происходить в следующем порядке:

1. Автономные территории и периферия.
2. Примыкающие к центру.
3. Центр.

Для лучшего понимания различий между вариантами расчета пиковой модели стоит разделить каждый вариант на две составляющие – территория и слои спроса. Тогда мы получим еще один вариант классификации способов расчета пиковой модели – в зависимости от того, сколько на этапе расчета учитывается кривых суточной неравномерности транспортного спроса:

1. Равномерно по типам территории, равномерно по слоям спроса (одна кривая суточной неравномерности)
2. Равномерно по типам территории, неравномерно по слоям спроса (количество кривых суточной неравномерности равно количеству слоев спроса)
3. Неравномерно по типам территории, неравномерно по слоям спроса (количество кривых суточной неравномерности равно количеству слоев спроса, умноженному на количество типов территорий).

Для предложенного территориального деления их будет 3.

В настоящее время в транспортной модели города Перми для расчета пиковых значений интенсивности используется второй вариант расчета – на основании опросов населения для каждого слоя спроса построена своя кривая суточной неравномерности [24].

При этом на этапе расчета спроса не производится деление функциональных зависимостей времени реализации транспортных корреспонденций в течение суток по территории города.

Раздел 7

Основные показатели качества транспортных моделей

После создания транспортной модели часто бывает необходимо оценить качество полученной модели.

Основные показатели качества транспортных моделей:

1. Размер модели (статистика).

Количество:

- узлов (дополнительно – детализация узлов: учет метода регулирования перекрестка, разные задержки для поворотных маневров);

- отрезков;

- примыканий;

- транспортных районов;

- пунктов остановок ОТ;

- маршрутов ОТ.

2. Детализация модели транспортного спроса.

- количество режимов (ИТ или ОТ);

- количество систем транспорта (ИТ – ЛА, ГА, ОТ – автобус, трамвай, троллейбус);

- количество слоев спроса;

- количество используемых функций предпочтения (одна для разных слоев спроса или разные).

3. Качество результатов расчета модели.

Значения:

- количество мест подсчета;

- коэффициент корреляции;

- средняя относительная ошибка;

- средняя абсолютная ошибка.

Таким образом, предложенные показатели качества транспортных моделей позволяют оценить как объем и качество используемых для создания модели исходных данных, так и качество функционирования модели, т.е. степень ее достоверности.

В табл. 7.1 приведены значения показателей качества транспортных моделей городов Пермь, Екатеринбург и Самара.

Таблица 7.1

**Значение показателей качества транспортных моделей городов
Пермь, Екатеринбург и Самара**

Элементы сети	Количество элементов в модели		
	Пермь	Екатеринбург	Самара
Размер модели (статистика)			
Узлы	5224	3756	14065
Отрезки	11784	8732	32234
Примыкания	4468	2252	12340
Транспортные районы	387	339	294
Остановки	464	520	455
Зоны остановки	907	1097	1102
Пункты остановки	931	1246	1214
Маршруты ОТ	109	149	175
Детализация модели транспортного спроса			
Количество режимов	2	2	2
Количество систем транспорта	7	8	8
Количество слоев спроса	15	15	16
Количество используемых функций предпочтения	15	15	16

Параметры качества результатов расчета модели и их значения для города Перми подробнее рассмотрены в разделе 9.

Общий объем исходных данных в оцифрованном виде для города Перми составляет 31 130 кб, для Екатеринбурга 26 752 кб, для Самары 35 350 кб.

Раздел 8

Методы верификации и калибровки транспортной модели

Процесс калибровки модели является одним из самых важных этапов в создании транспортной модели. В процессе калибровки необходимо добиться максимальной близости результатов, полученных на основе моделирования, и данных, собранных в результате проведенных обследований интенсивности транспортных потоков. С этими целями используются собранные натурные данные разных годов.

Для транспортной модели города Перми были использованы данные об интенсивности транспортных потоков, полученные в ходе обследований, проведенных в 2001–2010 гг.

Перейдем к описанию процесса калибровки моделей и оценки качества транспортных моделей.

8.1. Этапы и последовательность калибровки транспортной модели города

С совершенствованием методики и технологий разработки транспортных моделей городов на первое место выходят вопросы оценки адекватности создаваемых транспортных моделей. Постоянное совершенствование набора определяющих соотношений, закладываемых производителями в разработку своих алгоритмов, определяет дальнейшее качество итоговых транспортных моделей как некоторую функцию качества исходной информации, используемой для создания этих моделей.

Основу качества современных транспортных моделей определяет качество создаваемых моделей транспортного спроса. Задача адекватной формализации существующего транспортного спроса в городах является не только самой значимой, но и самой трудоемкой, как в пла-



Рис. 8.1. Составляющие транспортной модели

не сбора исходных данных, так и в плане последующих расчетов и верификации итоговых моделей.

Транспортная модель – это, прежде всего, математическая модель. Как любая математическая модель, она состоит из базы данных и набора определяющих соотношений, связывающих эти данные (рис. 8.1). Соответственно, следует различать принципы, алгоритмы и технологии, позволяющие улучшать качество как одной, так и другой составляющей транспортных моделей.

Постоянное совершенствование набора определяющих соотношений, закладываемых исследователями в разработку своих алгоритмов, определяет дальнейшее качество итоговых транспортных моделей как некоторую функцию качества исходной информации, используемой для создания этих моделей.

Под калибровкой транспортных моделей понимают широкий набор способов, технологий и инструментов, целью которых является повышение достоверности модели, то есть ее соответствие наблюдаемым состояниям функционирования транспортной системы.

Информационной основой для такой калибровки являются натурные данные о существующей интенсивности транспортных и пешеходных потоков, а также скорости транспортных потоков, собираемые на действующей сети (рис. 8.2).

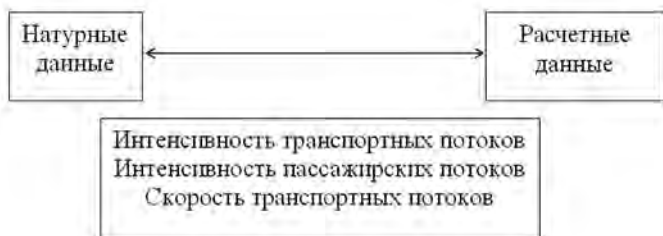


Рис. 8.2. Информационная основа для калибровки

Калибровка модели осуществляется путем сравнения рассчитанных значений параметров, таких как значения интенсивности, с натурными данными, полученными в результате обследований транспортных потоков.

Корень слова – термина «калибровка» заимствован из иностранного языка. Это же относится и к часто употребляемым терминам «верификация» и «валидация». В этих терминах можно представить последовательность операций по повышению общего качества транспортных моделей.

На рис. 8.3 представлен алгоритм последовательных шагов, проводимых разработчиками и пользователями транспортных моделей с целью их актуализации.

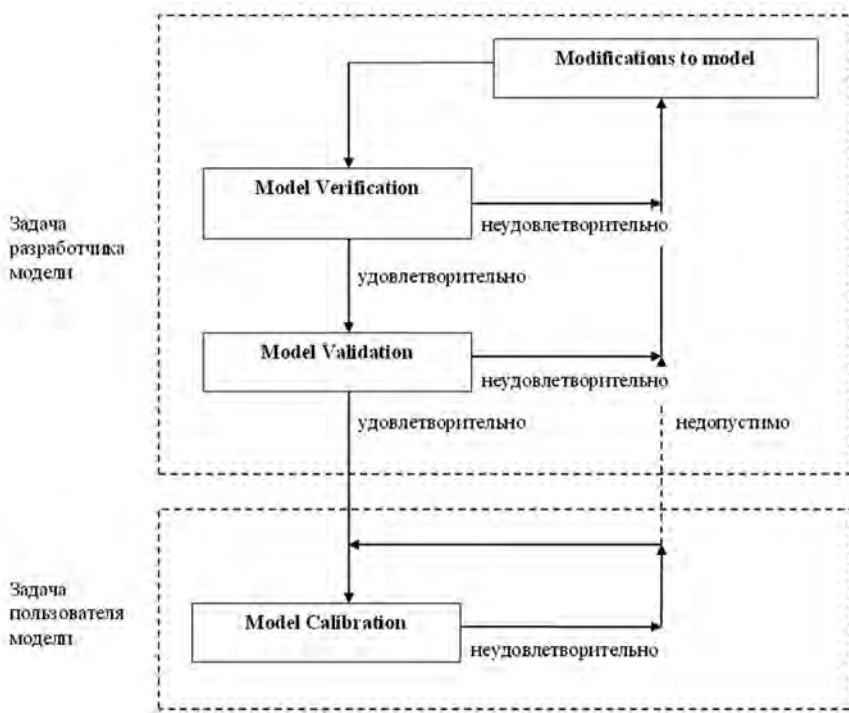


Рис. 8.3. Последовательность шагов повышения качества транспортных моделей

Следует отметить, что различие в терминах «верификация» и «валидация» хорошо объясняется представленной на рис. 8.1 схемой составляющих транспортных моделей.

В первом приближении можно заключить, что процесс верификации относится к исходным данным, участвующим в модели, в то время как термин «валидация» относится к проверке работоспособности не-

посредственно алгоритма расчета, т.е. к качеству построенных определяющих соотношений.

Заключительный этап создания транспортной модели именуется термином «калибровка». Процесс калибровки также затрагивает набор определяющих соотношений транспортной модели и представляет собой процесс уточнения набора параметрических функций, заложенных в определяющие соотношения модели на основе собираемых натурных данных, и предварительно верифицированных входных данных модели.

На всех этапах разработки транспортных моделей выделяют следующие основные виды ошибок, которые определяют необходимость калибровки модели:

1. Ошибки спецификации модели – ошибки, вызванные несовершенным пониманием поведения лиц, совершающих корреспонденции, или реакции на изменения в транспортном предложении.

2. Ошибки детализации – ошибки, вызванные качеством абстрагирования и агрегирования модели. Обычно модели агрегируются по лицам, совершающим корреспонденции (например, агрегирование по домашним хозяйствам или зонам проживания), по целям поездки, периодам времени и способам поездки.

3. Ошибки натурных данных – ошибки, связанные со сбором и обработкой данных для калибровки. Могут быть связаны со случайной ошибкой при сборе, вводе, проверке или редактировании натурных данных для калибровки.

4. Ошибки входных данных – включают ошибки во входных данных, используемых в модели. Этот тип ошибки может быть выявлен в процессе проверки модели: параметров сети, расчетных процедур, данных статистики, таких, как население и рабочие места.

Подходы к процессу повышения качества транспортных моделей можно отнести к двум составляющим транспортной модели:

- Транспортный спрос;
- Транспортное предложение.

В каждой группе верифицируются и калибруются последовательно глобальные и локальные параметры, т.е. параметры, характерные для всего объекта моделирования, и параметры, распределенные в пространстве.

Цели мероприятий каждого этапа повышения качества транспортной модели:

Верификация

Цель этапа верификации модели заключается в проверке логики модели. На данном этапе выполняется проверка, соответствуют ли полученные результаты расчета модели набору входных параметров, насколько ожидаемы полученные результаты.



Рис. 8.4. Структура и последовательность мероприятий по калибровке транспортной модели

Валидация

Цель этапа валидации модели – оценить способность модели соответствовать выбранным начальным значениям (аналитическое решение или натурные данные) для конкретной области применения.

Калибровка

Цель этапа калибровки модели – добиться идентичности расчетных и натуральных характеристик функционирования транспортной системы города. Калибровка определяется как процесс отбора лучшего набора параметров модели.

Калибровка проводится на каждом шаге четырехшаговой транспортной модели:

1. Генерация;
2. Распределение;
3. Расщепление;
4. Перераспределение.

При этом последовательность необходимых операций при калибровке транспортных моделей определяет не только итоговое качество процесса и результата, но и его трудоемкость.

Следование основному принципу – «от глобального к локальному» может существенно упростить и ускорить создание, а также повысить качество итоговых транспортных моделей в ходе их калибровки. Структура и последовательность мероприятий по калибровке транспортной модели представлена на рис. 8.4.

При верификации и калибровке транспортной модели возможно также использование ряда процедур, основанных на привлечении следующих дополнительных источников информации:

- задание максимальной пропускной способности перегонов УДС на основе собираемых натурно данных об интенсивности движения транспорта;

- уточнение исходных данных по транспортному спросу путем использования данных Пенсионного фонда РФ;

- сопоставление рассчитываемых на основе энтропийных и гравитационных моделей матриц корреспонденций с матрицами корреспонденций, восстановленными по данным Пенсионного фонда РФ.

8.2. Верификация и калибровка транспортного спроса

Для последующего уточнения отдельных (особо важных) величин существующего транспортного спроса (отдельных элементов матриц корреспонденций) для результирующей матрицы мы используем обобщенную модификацию алгоритма восстановления матриц корреспонденций, предложенного профессором А.Ю. Михайловым [25].

Для этого разработан специальный алгоритм восстановления матрицы корреспонденций на основе данных натурных наблюдений [26]. Алгоритм реализован в виде отдельной процедуры непосредственно в СУБД данных мониторинга транспортных потоков.

Процедура основана на расчете корреспонденций между двумя перекрестками (узлами) графа УДС. При расчете корреспонденции между двумя перекрестками, не имеющими общих перегонов, оперируют двумя понятиями:

Общий транспортный поток (Q). Это наблюдаемый транспортный поток в сечении каждой проезжей части при движении транспорта от одного перекрестка к другому. Характеристики общего транспортного потока определяются на основании натурных замеров, а их совокупность определяет мгновенное распределение транспортных потоков.

Частный транспортный поток (q). Это расчетный транспортный поток, представляющий на каждом перегоне некую долю общего транспортного потока. По аналогии с методами «номерного знака» или ярлыков – это количество маркированных автомобилей в общем потоке.

Основным условием качественной работы описанной выше процедуры восстановления элементов матриц корреспонденций является использование достаточно подробной, собранной натурным способом информации о распределении транспортных потоков в узлах, причем на всей исследуемой территории.

Для небольшого района города также возможна и динамическая проверка качества модели транспортного спроса. При этом, кроме рассчитанной модели распределения транспортного спроса, предполагаются известными временные суточные графики интенсивности движения транспортных средств в пунктах входа в транспортную сеть района, включая временные и постоянные стоянки внутри района, а также суточные графики процентного отношения распределения исходящих машин с перекрестка (узла графа УДС) по всем возможным направлениям их дальнейшего движения.

Для реализации динамической проверки схему наблюдаемых автомобильных транспортных потоков района представим в виде графа с внутренними узлами (перекрестки) и внешними узлами (пункты входа и выхода в транспортную сеть района), соединенными между собой дугами (перегонами улично-дорожной сети) (рис. 8.6).

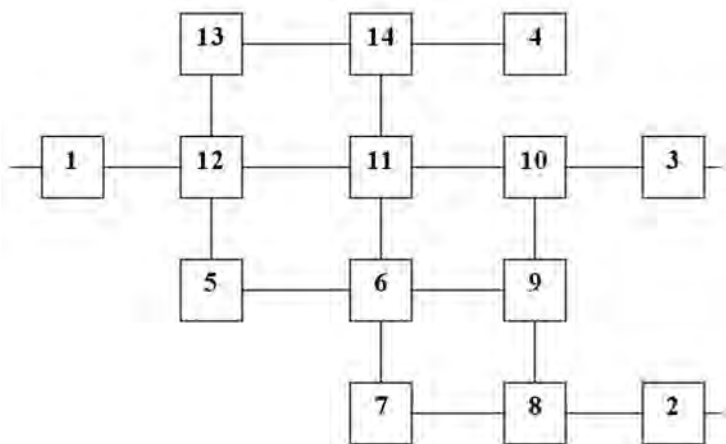


Рис. 8.6. Общая схема графа сети с внутренними и внешними узлами

Пусть $b = b(i, j, u)$ – функция от u , обозначает количество автомобилей (поток), идущих из пункта i в вершину j за время u -го такта. Для всех внешних вершин i графа эта функция считается заданной.

Пусть $a = a(i, j, k, u)$ – функция от u , обозначает процентную составляющую (количество процентов) потока $b(i, j, u)$, идущего из пункта i через вершину j в пункт k за время u -го такта.

Эти величины считаем заданными, они удовлетворяют условию:

$$\sum_j a(i, j, k, u) = 100\%$$

Идея алгоритма состоит в переборе всех тактов с 0, 1, 2, ..., в каждом из которых находим величины $b(i, j, u) > 0$, которые разделяем по соответствующим направлениям пропорционально значениям $a(i, j, k, u)$ для получения в сумме потока $b(j, k, u + 1)$, уже для распределения в следующем такте.

Вид внутренней клетки (i, j) приведен на рис. 8.7.

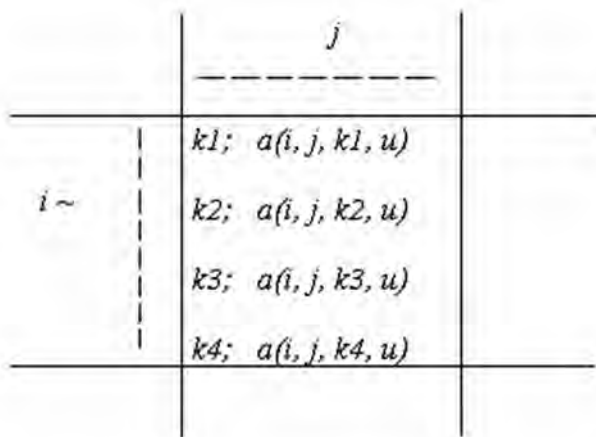


Рис. 8.7. Обозначение и структура внутреннего узла графа

Конечная цель проверки параметров транспортного спроса в исследуемом районе – реализация всех тактов распределения транспортного спроса по существующей ограниченной сети при соблюдении ограничений на пропускную способность узлов и дуг графа улично-дорожной сети.

Итоговая модель транспортного спроса представляет собой пространственно распределенную матрицу спроса или, по-другому, матрицу корреспонденций. Число строк в матрице равно числу столбцов и соответствует числу транспортных районов в модели спроса. Элементы итоговой матрицы представляют собой транспортные связи между парой районов.

Сумма всех элементов матрицы – это объем транспортного движения в городе за какой-то период времени (чаще всего за сутки). Как и любая пространственно распределенная информация, модель транс-

портного спроса может быть представлена графически. Удобно представлять транспортный спрос в виде так называемого «паука корреспонденций».

Паук корреспонденций – это набор отрезков, построенных на плане города. Длина отрезка – это расстояние между двумя транспортными районами, между которыми существует транспортная корреспонденция, толщина линии отрезка определяется объемом этой корреспонденции. На рис. 8.8 в виде «паука корреспонденций» графически представлен весь рассчитанный объем транспортного спроса в городе Перми.

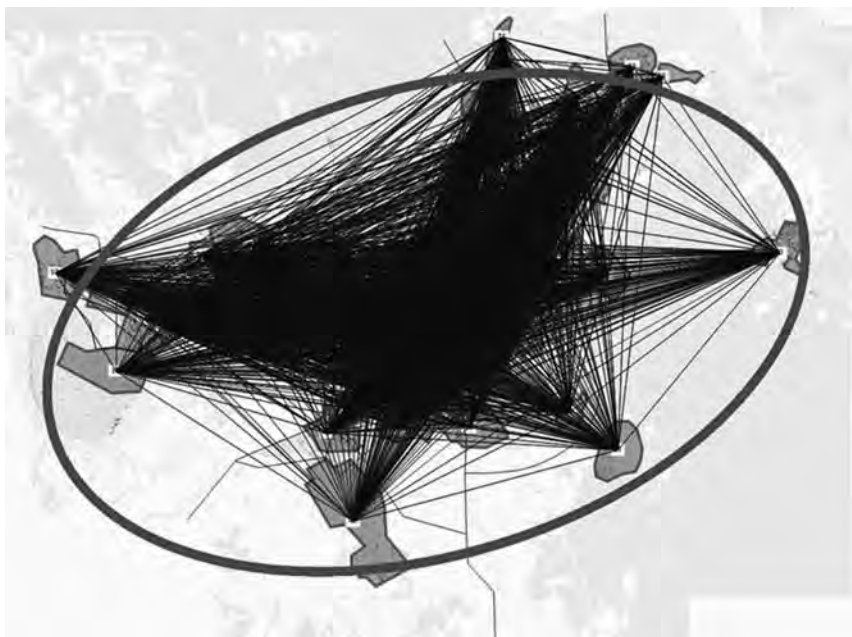


Рис. 8.8. Пример «паука» транспортных корреспонденций

«Паук» корреспонденций (или «сеть» корреспонденций) представляет собой набор парных связей источник–цель всех транспортных корреспонденций, реализуемых в городе в течение суток. Такое представление из-за большой размерности итоговой матрицы корреспонденций в модели транспортного спроса напоминает паутину.

Представляется интересным графическое изображение транспортного спроса по агрегированным транспортным районам, например, административным районам города. Такие построения наглядно определяют тяготения транспортных корреспонденций и объемы транспортных связей между административными единицами города, региона, края (рис. 8.9).

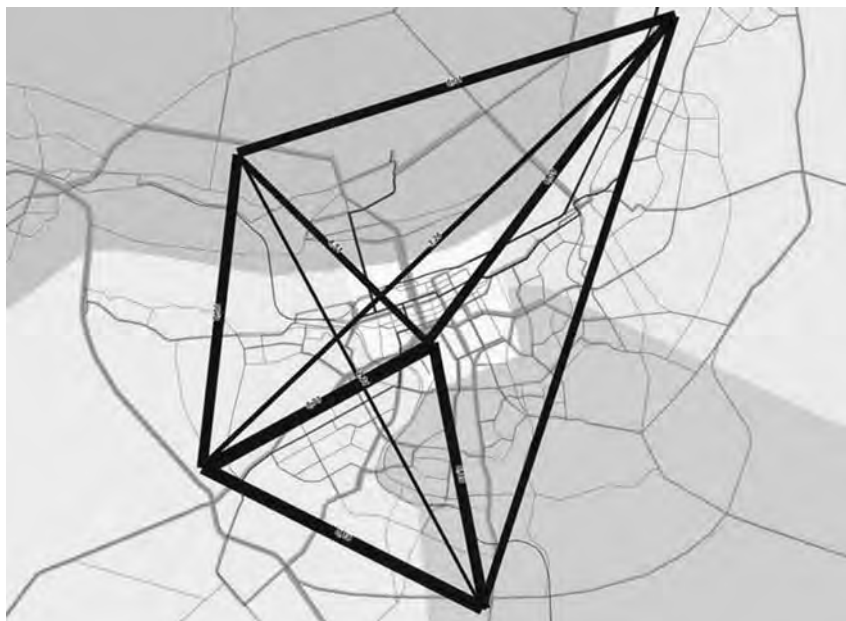


Рис. 8.9. Пример «паука» транспортных корреспонденций для агрегированных районов города

8.3. Верификация и калибровка транспортного предложения

8.3.1. Задание максимальной натурной пропускной способности перегонов

С целью уточнения максимальной пропускной способности перегонов УДС предлагается проводить сравнительный анализ введенных в модель значений пропускной способности (расчетных) и данных натурных обследований интенсивности движения транспортного потока (максимальный поток за полчаса).

С целью повышения достоверности параметров пропускной способности элементов УДС целесообразно проводить замену расчетных значений максимальной пропускной способности перегонов на наблюдаемые для всех участков, для которых проводились обследования интенсивности транспортных потоков.

Таким способом для модели города Перми было произведено изменение значений пропускной способности для 1625 участков, составляющих граф УДС в модели транспортного предложения.

Сравнительный анализ было решено проводить для участков, где наблюдаются регулярные заторы в течение дня. Это ЦПР, ЦГЯ и въезды в ЦПР.

Была произведена замена введенных в модель значений максимальной пропускной способности перегонов на наблюдаемые для всех участков, для которых проводились обследования интенсивности транспортных потоков. Максимальную пропускную способность ограничили дневным потоком (с 7-00 до 20-00 часов), что соответствует 13 часам, или 26 наблюдаемым получасовым интервалам.

Всего было произведено изменение значений пропускной способности для 1625 участков, составляющих граф УДС в модели транспортного предложения.

В результате внесенных изменений пропускной способности было замечено улучшение корреляции расчетных значений интенсивности движения с натурными данными.

Значения параметров качества расчета модели до и после изменения пропускной способности приведены в табл. 8.1.

Как видно по табл. 8.1, использование на этапе построения модели транспортного предложения данных натурной (наблюдаемой) пропускной способности элементов (ребер) графа УДС повышает итоговое качество транспортной модели.

Однако при этом требуется жесткий контроль качества натурно собранного материала о максимальной пропускной способности участков сети. В частности, замене подлежат только те участки УДС, информация об интенсивности движения на которых была гарантированно собрана при максимальной загрузке этого участка движением.

Таблица 8.1

Значения параметров качества расчета модели до и после изменения пропускной способности для города Перми

Параметр качества расчета модели	Значение параметра качества расчета	
	до изменения пропускной способности	после изменения пропускной способности
Средняя абсолютная ошибка	3957	3489,9
Средняя относительная ошибка	28,7%	27,4%
Абсолютное значение RMSE	5431	4615,2
Относительное значение RMSE	0,394	0,363
Коэффициент корреляции	0,78	0,86

8.3.2. Калибровка модели индивидуального транспорта

После создания модели транспортного предложения необходимо оценить достоверность результатов расчета, т.е. соответствуют ли модели транспортного спроса, транспортного предложения и их взаимодействия реальной ситуации, наблюдаемой на улицах города.

Для этого следует сопоставить значения интенсивности движения, рассчитанные при существующем состоянии улично-дорожной сети и существующих показателях функционирования автомобильного транспорта (уровень автомобилизации, частота использования автомобиля), с фактической интенсивностью движения.

При калибровке в первую очередь необходимо проверить параметры транспортного предложения: количество полос, пропускную способность, разрешенную скорость на отрезках, задержки в узлах и поворотах, а также другие характеристики отрезков и узлов.

Не менее важно правильно подобрать параметры CR-функции, сравнивая натурные и расчетные скоростные характеристики транспортных потоков.

Особое внимание следует уделить правильности расстановки примыканий. Примыкания в модели должны быть расставлены так, чтобы узлы, с которыми соединяются примыкания, примерно соответствовали местам автопарковок и съездам во внутريدворовые территории.

Объемы движения по примыканиям задаются долями входа в сеть от общего объема движения из района. Несовпадение модельных параметров участка УДС и его параметров в реальной ситуации также может быть связано с состоянием дорожного покрытия, с объемами паркования транспорта.

Другой наиболее часто встречающийся источник расхождения результатов расчета с натурными данными – несовпадение модельных параметров участка УДС и его параметров в реальной ситуации. Это может быть связано с состоянием дорожного покрытия, с большим количеством припаркованного транспорта.

Для исправления указанных ошибок необходимо скорректировать на основе натурных данных об интенсивности максимальные пропускные способности участков УДС и параметры функций сопротивления.

8.3.3. Калибровка модели общественного транспорта

При калибровке модели ОТ, так же как и модель ИТ, сопоставляется с данными натурных обследований. Для калибровки модели ОТ используются два наблюдаемых параметра: суточная нагрузка на маршрут и суточная нагрузка на перегон (т.е. количество всех пассажиров, проехавших через перегон на всех маршрутах).

В качестве параметров локальной калибровки можно использовать данные о количестве входящих, выходящих и пересеживающихся пассажиров для каждой остановки. Аналогично ситуации с индивидуальным транспортом, в модель вводятся имеющиеся натурные данные о пассажиропотоке на остановках. Далее рассчитываются параметры оценки качества – коэффициент корреляции, абсолютная и средняя ошибка, RMSE (корень из среднего возведенного в квадрат отклонения).

На первом этапе калибровка выполняется по общему объему пассажиропотока – общее количество входящих и общее количество выходящих пассажиров на остановочном пункте. В первую очередь, необходимо добиться правильного относительного распределения потоков пассажиров по остановочным пунктам.

Адекватность относительного распределения определяется коэффициентом корреляции. Корректировка относительного распределения пассажиропотока проводится изменением параметров примыканий (затраты времени для пешеходов) и заданием баланса ИТ/ОТ в транспортных районах.

На втором этапе выполняется оценка пассажиропотоков по отдельным маршрутам. Выполняется проверка общего количества пассажиров на каждом маршруте, затем пассажиропотоки по маршрутам сверяются с данными натурных обследований на остановках. При проверке маршрутов выполняется корректировка ввода расписания и вид функции затрат для ОТ.

Также можно оценить для каждого перегона, откуда и куда едут пассажиры. Это позволяет отследить, в первую очередь, правильность моделирования транспортного спроса – верно ли определены основные источники и цели корреспонденций.

Раздел 9

Оценка качества транспортной модели

Для оценки адекватности и качества транспортных моделей используют общепринятые статистические критерии, которые позволяют быстро оценивать основные качественные параметры созданных моделей. Следует заметить, что в среде транспортных инженеров, занимающихся вопросами транспортного моделирования, сложились определенные доверительные границы, при которых на основании существующего набора статистических критериев созданная транспортная модель имеет право быть использованной в практических транспортных расчетах.

Оценка проводится по следующим параметрам:

1. Средняя абсолютная ошибка:

среднее отклонение абсолютных значений (разница между наблюдаемым и рассчитанным значением)

$$(\delta_a) = \frac{1}{N} \cdot \sum abs(Z_i - U_i), \quad (9.1)$$

где Z – наблюдаемое значение; U – значение, полученное из модели; N – количество точек наблюдения.

2. Средняя относительная ошибка:

среднее отклонение абсолютных значений в %

$$(\delta_p) = \frac{\sum abs(Z_i - U_i)}{\sum Z_i} \cdot 100\%, \quad (9.2)$$

где Z – наблюдаемое значение; U – значение, полученное из модели; N – количество точек наблюдения.

3. Абсолютное значение RMSE (root of mean squared error):
среднеквадратическое отклонение

$$(\vartheta_a) = \left[\sum_{i=1}^N (Z_i - U_i)^2 / N \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (9.3)$$

где Z – наблюдаемое значение; U – значение, полученное из модели; N – количество точек наблюдения.

4. Относительное значение RMSE (root of mean squared error):
относительное среднеквадратическое отклонение

$$(\vartheta_s) = \frac{\vartheta_a}{\sum Z_i / N} = \frac{\sqrt{\sum (Z_i - U_i)^2 / (N - 1)}}{\sum Z_i / N}, \quad (9.4)$$

где Z – наблюдаемое значение; U – значение, полученное из модели; N – количество точек наблюдения.

5. Коэффициент корреляции:

$$r = \frac{\sum (Z_i - \bar{Z}) \cdot (U_i - \bar{U})}{\sqrt{\sum (Z_i - \bar{Z})^2 \cdot \sum (U_i - \bar{U})^2}}, \quad (9.5)$$

$$\bar{Z} = \frac{1}{N} \cdot \sum Z_i, \quad \bar{U} = \frac{1}{N} \cdot \sum U_i, \quad (9.6)$$

где Z – наблюдаемое значение; U – значение, полученное из модели; N – количество точек наблюдения.

В качестве примера приведем указанные параметры качества прогнозной транспортной модели города Перми. Калибровка и последующая оценка качества прогнозной транспортной модели проводились при следующих основных характеристиках модели и натурных данных, используемых для калибровки (табл. 9.1).

В результате проведенной процедуры калибровки были получены показатели качества прогнозной транспортной модели города Перми, как показано в табл. 9.2.

Достаточно большое значение среднеквадратического отклонения связано с тем, что значения параметров качества расчета транспортной

Таблица 9.1

**Основные характеристики модели и натуральных данных,
используемых для калибровки (Пермь)**

Элементы сети	Количество элементов в модели
Размер модели (статистика).	
Узлы	5224
Отрезки	11784
Примыкания	4468
Транспортные районы	387
Остановки	464
Зоны остановки	907
Пункты остановки	931
Маршруты ОТ	109
Детализация модели транспортного спроса	
Количество режимов	2
Количество систем транспорта	7
Количество слоев спроса	15
Количество используемых функций предпочтения	15
Показатели калибровки	
Количество точек натуральных обследований	400
Среднее наблюдаемое значение $\bar{Z}$	12739 (авт./сутки)
Среднее расчетное значение $\bar{U}$	11001 (авт./сутки)

модели были получены с учетом всех имеющихся натуральных данных о значениях интенсивности.

Отбросим как явно ошибочные те натурные значения, для которых $abs(Z_i - U_i) > 3\vartheta_a$.

Всего в используемом наборе натуральных данных оказалось 15 значений, для которых выполнялось условие $abs(Z_i - U_i) > 3\vartheta_a$.

Таблица 9.2

**Значения параметров качества расчета транспортной модели
города Перми**

Параметр качества расчета модели	Значение параметра качества расчета
Средняя абсолютная ошибка	3489,9
Средняя относительная ошибка	27,4
Абсолютное значение RMSE	4615,2
Относительное значение RMSE	0,363
Коэффициент корреляции	0,86

Данные значения были исключены из расчета параметров качества модели, то есть расчет параметров качества проводился по 385 точкам (значениям).

В итоге получены следующие значения параметров качества расчета транспортной модели – представлены в виде табл. 9.3:

Таблица 9.3

**Итоговые (скорректированные) значения параметров качества расчета
транспортной модели городов Пермь и Самара**

Параметр качества расчета модели	Значение параметра качества расчета	
	Транспортная модель г. Перми	Транспортная модель г. Самары
Количество точек наблюдения	385	291
Средняя абсолютная ошибка	2 896,9	4 803
Средняя относительная ошибка	22,7%	30,4%
Абсолютное значение RMSE	3 605,6	6196
Относительное значение RMSE	0,283	0,393
Коэффициент корреляции	0,916	0,865

Рассмотрим подробнее полученные значения параметров качества расчета модели. Значение коэффициента корреляции 0,916 говорит о том, что натурные и расчетные значения интенсивности имеют довольно сильную связь друг с другом. При этом значения средней относительной ошибки и относительного RMSE достаточно велики. Тем не менее, это можно объяснить использованием достаточно большого набора натуральных данных (385 точек наблюдения) и спецификой сбора натуральных данных.

Дело в том, что используемые при калибровке натурные данные собирались не одномоментно, а в разные дни недели для разных точек наблюдения. В связи с этим используемый при калибровке набор натуральных данных имеет ряд несогласованностей, связанных с локальными условиями дорожного движения в той или иной точке наблюдения.

Во время сбора натуральных данных в разные дни на разных участках УДС происходили ДТП, ремонтные работы, а также имели место прочие факторы, влияющие на условия движения. В таких условиях при недостатке информации водители транспортных средств, участвующие в дорожном движении, принимают решения об изменении привычного маршрута движения случайным образом, существенно отличающимся от алгоритма перераспределения, используемого в расчетах. В связи с этим расчетные объемы транспортного движения в той или иной области могут не совпадать с натурными данными.

Основываясь на этом практическом наблюдении, для улучшения качества натуральных данных предлагается проводить обследования транспортных потоков в максимально сжатые по времени сроки, в том числе за счет использования автоматизированных средств сбора данных (датчиков и видеорегистраторов).

Представляется целесообразным также использовать для оценки качества транспортной модели критерий Фишера. Однако при расчете критерия Фишера возникает проблема, связанная со сложностью формализации числа степеней свободы.

Раздел 10

Возможности анализа результатов моделирования

Интерес исследователя, занимающегося прогнозированием параметров функционирования транспортной системы крупного города, обычно вызывают следующие элементы системы и показатели их работы:

Отрезки: нагрузка индивидуального транспорта, пассажиропоток на общественном транспорте, время движения в пустой и нагруженной сети, коэффициент загрузки.

Маршруты ОТ: пассажиропоток, время движения между остановками.

Остановки: количество пассажиров – входящих, выходящих, транзитных с остановкой/без остановки по маршрутам/системам транспорта/всего.

Перекрестки: распределение движение на перекрестке по направлениям.

На рис. 10.1 приведено окно редактора параметров отрезков транспортной модели города Екатеринбурга. В модели представлены основные параметры: длина, разрешенная скорость, количество полос, пропускная способность, натурная интенсивность индивидуального транспорта.

Подобный набор атрибутивной информации содержит каждый отрезок улично-дорожной сети в каждом из направлений движения. Данные параметры используются в работе алгоритма транспортной модели.

На рис. 10.2 представлено распределение интенсивности транспортных потоков по направлениям на перекрестке. Каждое число соответствует интенсивности транспортных потоков на соответствующем маневре через перекресток. Число ниже черты указывает интенсивность суммарного потока на въезде на перекресток.

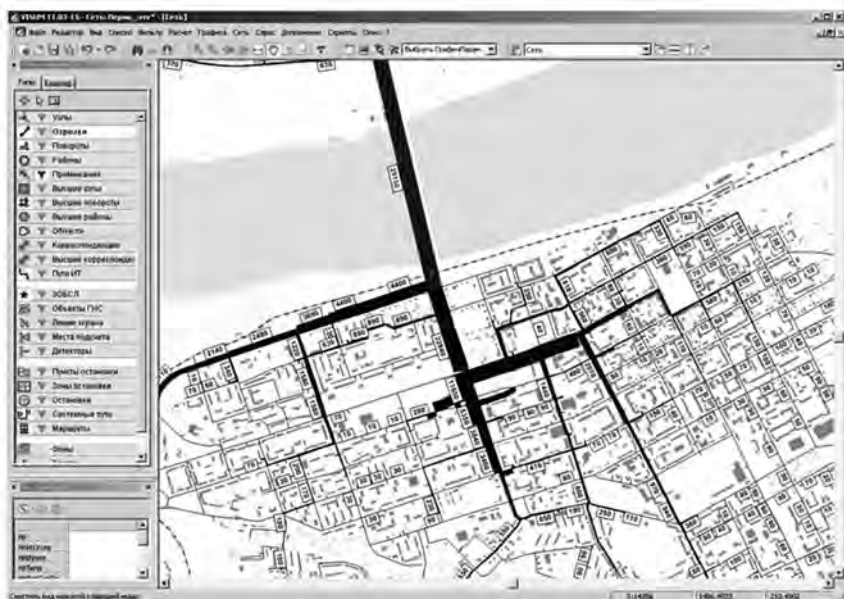


Рис. 10.3. Паук корреспонденций для участка УДС.
Транспортная модель города Перми

Подобное отображение информации расчета транспортной модели используется преимущественно для последующего расчета и назначения параметров регулирования на данном перекрестке: общий цикл светофора, план сигналов. Обычно такие расчеты проводятся с помощью имитационного моделирования на микроуровне.

На рис. 10.3 приведен так называемый «паук» корреспонденций для конкретного выбранного участка УДС. Светло-серой балкой выделен сам исследуемый участок. В данном случае на рисунке представлен Коммунальный мост через реку Кама в городе Перми. Более темные балки отображают интенсивности транспортных потоков, которые движутся через исследуемый участок (по мосту).

Интерес исследователя представляет анализ использования участка УДС с точки зрения совокупности пользователей транспортной системой.

На такой диаграмме можно наглядно проследить, какие маршруты движения преобладают на Коммунальном мосту, кто и с какими целями использует данный участок инфраструктуры.

На рис. 10.4 приведены балки интенсивностей пассажирских потоков для транспортной модели города Перми. Данный результат расчета является основным критерием оценки качества функционирования системы городского пассажирского транспорта общего пользования.

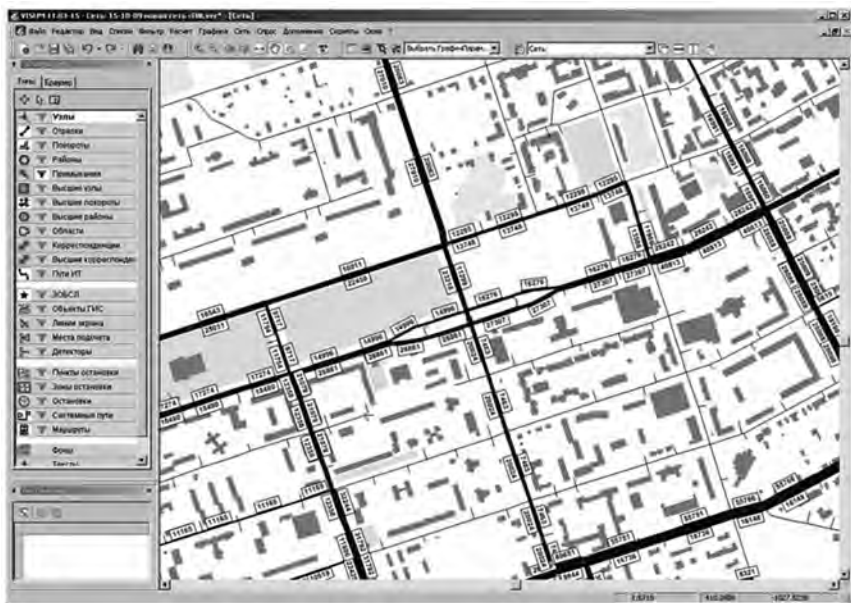


Рис. 10.4. Значения интенсивности пассажиропотоков.
Транспортная модель города Перми

Цифры на отрезках на рис. 10.4 показывают количество пассажиров, перевезенных по данному участку всеми видами и маршрутами транспорта, через него проходящими, в течение дня. Помимо того существует возможность отобразить на балках пассажиропоток на отдельном маршруте или системе городского пассажирского транспорта общего пользования, а также в отдельный промежуток времени, в случае если произведен соответствующий расчет.

На рис. 10.5 показано окно редактирования времени движения маршрута ОТ между остановочными пунктами. Данную процедуру обычно используют при анализе и прогнозировании увеличения либо уменьшения количества графиков движения на одном из маршрутов, а также при изменении скорости движения на маршруте, например, после ремонта трамвайных путей.

Результат расчета модели покажет, как изменится пассажиропоток в связи с такими изменениями объемов транспортной работы на маршруте.

На рис. 10.6 приведено общее количество входящих и выходящих пассажиров на остановочном пункте.

Чаще всего этот расчетный параметр является основой калибровки модели в части транспортного спроса на услуги городского пассажирского транспорта общего пользования. Цифрами на рис. 10.6 показано количество входящих и выходящих пассажиров на данной остановке

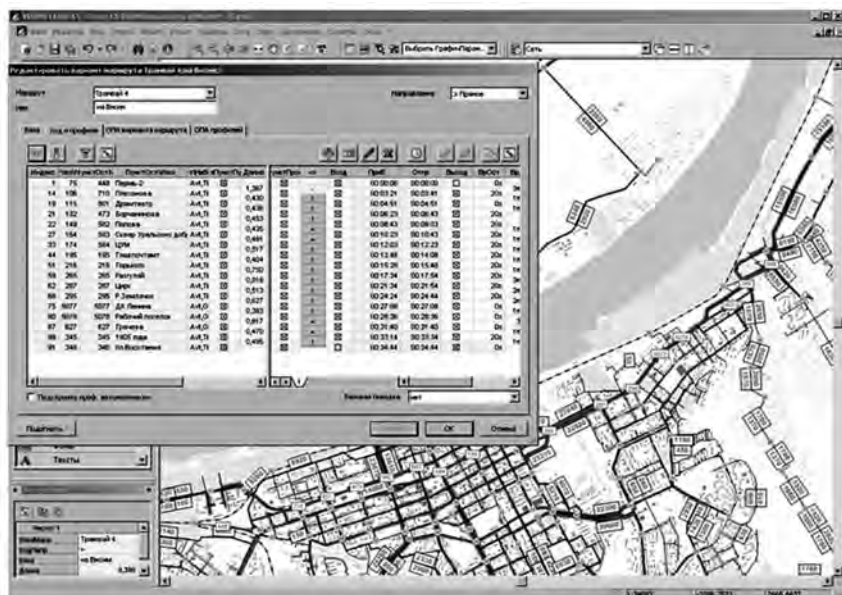


Рис. 10.5. Время движения между остановками на маршруте ОТ. Транспортная модель города Перми

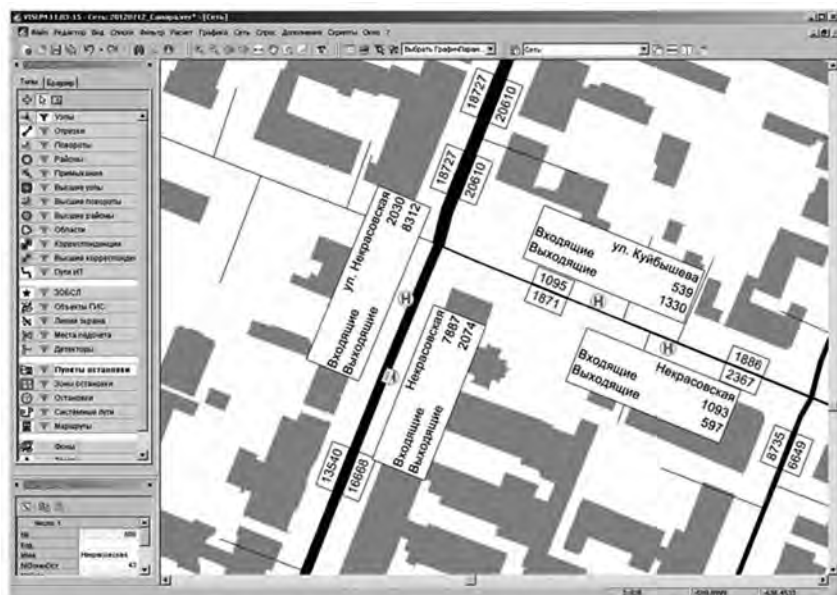


Рис. 10.6. Общее количество входящих и выходящих пассажиров на остановочных пунктах, пасс./сут. Транспортная модель г.о. Самара

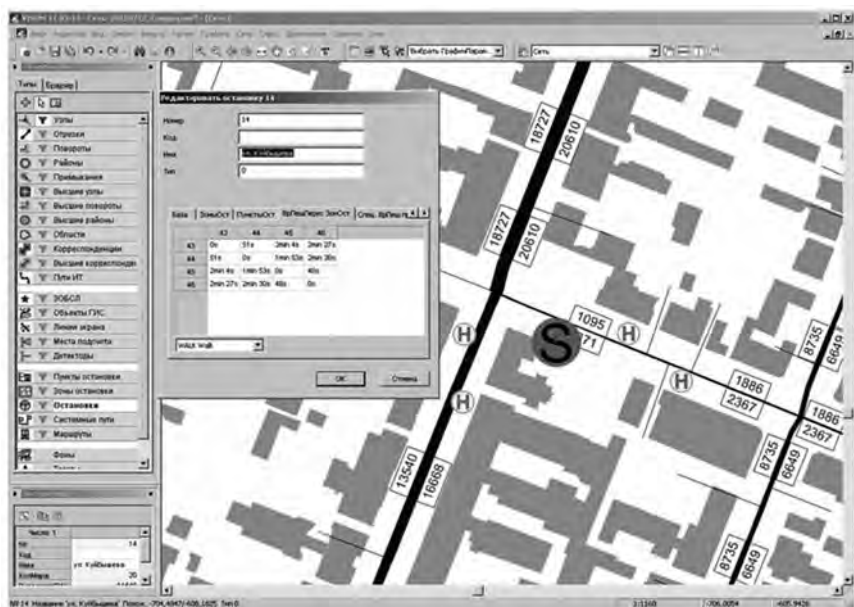


Рис. 10.7. Матрица времени пешеходного перехода между зонами остановки. Транспортная модель г.о. Самара

со всех единиц подвижного состава общественного транспорта, останавливающихся на данной остановке.

При калибровке этот расчетный показатель сравнивается с натурными данными, полученными при подсчете людей на остановке, и на основе сравнения расчетных и натуральных данных производятся необходимые процедуры калибровки модели транспортного спроса. Кроме информации о входящих и выходящих пассажирах, возможно также отображать информацию о количестве пассажиров пересеживающих и следующих транзитом.

На рис. 10.7 показан пример матрицы времени пешеходного перехода между зонами остановки.

Процедура формирования матрицы затрат на пересадку – это основная процедура при проектировании мультимодальных остановочных комплексов. Цифрами в таблице на рис. 10.7 указано время пешего перехода от одной посадочной площадки до другой. Данные значения времени в дальнейшем входят в матрицу затрат при реализации каждой корреспонденции, имеющей пересадку.

Транспортная модель, оперируя пространственно распределенными данными, несет в себе функции полноценной географической информационной системы (ГИС). Как и в любой ГИС, в ней возможны отображение и картографический анализ большого количества входных и выходных данных модели.

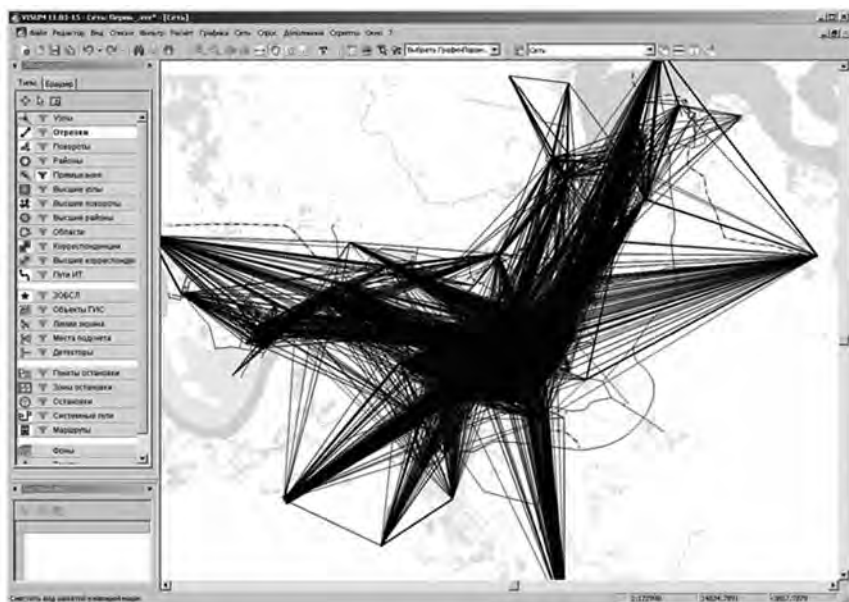


Рис. 10.8. Паук транспортных корреспонденций на индивидуальном транспорте. Транспортная модель города Перми

Общее представление о характере транспортного спроса в системе дает анализ «паука» корреспонденций, построенных по воздушным линиям, соединяющим транспортные районы города.

Аналогичным образом можно также представить «паук» корреспонденций для отдельных элементов сети – узлов, отрезков, остановок, районов, построенных как для общественного, так и для индивидуального транспорта.

Различные способы отображения результатов прогнозов, выполненных на транспортной модели, изложены в [27, 28].

На рис. 10.8 приведен «паук» транспортных корреспонденций для города Перми, на рис. 10.9 – «паук» трудовых корреспонденций на общественном транспорте для г.о. Самара.

Паук корреспонденций позволяет оценить величину транспортной обеспеченности той или иной территории города.

Кроме возможности анализа территориально распределенных величин, модель позволяет рассчитывать ряд глобальных характеристик для всей сети, таких как:

- $ТС \times км$, суммарный пробег всех автомобилей в сети;
- $ТС \times ч$, суммарное время реализации транспортных корреспонденций в сети;
- средняя скорость в сети;
- среднее время реализации транспортных корреспонденций.

Раздел 11

Перспективы развития транспортных моделей

Развитие и совершенствование средств моделирования и прогнозирования как инструментов выработки и принятия решений по развитию транспортных систем городов набрало в настоящий момент в России стремительные обороты.

Количество действующих лицензий на программные продукты в области прогнозного и имитационного моделирования поведения транспортных систем в десятки раз превышает количество созданных на их платформе транспортных моделей. В настоящий момент в нашей стране наблюдается фаза коммерческого насыщения рынка программных продуктов.

Производители и продавцы систем транспортного моделирования вместе с продажами своих программных продуктов могут подготовить профессиональных пользователей того или иного продукта, но не способны подготовить полноценного транспортного инженера.

С другой стороны, российские разработчики математических алгоритмов моделирования поведения различных элементов и процессов функционирования транспортных систем не находят практической реализации для своих разработок. В первую очередь это связано с нежеланием или невозможностью доведения этих разработок до продукта (программного продукта).

В силу вышеизложенного можно предположить, что развитие и практическое применение транспортных моделей в России будет находиться в прямой зависимости от способности системы высшего профессионального образования освоить подготовку специалистов по направлению 05.22.01 – «Транспортные системы страны, ее регионов и городов».

11.1. Взаимодействие разных видов транспортных моделей

Все более широкое распространение на сегодняшний день получают инструменты и средства транспортного моделирования и прогнозирования, а также программные продукты их реализации. По объектам приложения и целям различают транспортные модели прогнозные и имитационные.

Однако даже широко применяя указанный инструментарий, невозможно отказаться от субъективного подхода к выработке и принятию решений по развитию транспортных систем, в первую очередь, на этапе постановке сценариев такого развития.

С целью полной формализации и автоматизации всех процессов, связанных с развитием и эффективным функционированием действующих транспортных систем, предлагается новый подход, предполагающий создание оптимальных (предпрогнозных) транспортных моделей [29].

Постановка и решение оптимальных моделей позволяет сформировать всесторонне обоснованный пакет сценариев последующего развития транспортной системы города с точки зрения повышения качества жизни населения. Можно сформировать экономически обоснованную программу мероприятий по повышению эффективности функционирования городской транспортной системы.

Таким образом, можно говорить о том, что впервые создан инструмент, позволяющий оценить имеющиеся в распоряжении сообщества различные ресурсы в отношении их запасов и влияния на эффективность транспортной системы города.

По отношению к прогнозным и имитационным транспортным моделям такие модели имеют более высокий уровень – это предпрогнозные модели (рис. 11.1).

Оптимальные модели имеют обратные связи с отдельными компонентами прогнозных транспортных моделей. В свою очередь, результаты решения таких моделей определяют оптимальные сценарии развития всей транспортной системы города. Более подробно методика создания оптимальных моделей изложена в [18].

Имея в распоряжении трехуровневую систему транспортных моделей (предпрогнозная, прогнозная, имитационная), можно сформировать единую систему выработки и принятия решений, направленных на эффективное, с точки зрения качества жизни, функционирование и развитие транспортной системы крупного города.



Рис. 11.1. Схема взаимодействия транспортных моделей различных уровней

11.2. Взаимодействие прогнозных транспортных моделей и интеллектуальных транспортных систем (ИТС)

Еще одним трендом в развитии прогнозных транспортных моделей является их совместное использование с интеллектуальными транспортными системами. Результатом такого взаимодействия становится разработка и внедрение системы краткосрочного (0,5–1 ч) прогнозирования ситуации с функционированием транспортной системы. Система основывается на транспортной модели города, выполненной средствами PTV Vision ®Visum, и данных системы управления и мониторинга дорожного движения (АСУДД).

Принятие управленческих решений в сфере управления и регулирования дорожного движения осуществляется на основе результатов краткосрочного прогнозирования, выполненного на прогнозной транспортной модели города на основе текущих значений характеристик транспортных потоков, собранных с помощью датчиков и камер наблюдения, входящих в состав АСУДД.

Таковыми характеристиками являются, прежде всего, интенсивность и скорость транспортных потоков.

Кроме того, в качестве исходных данных для краткосрочного прогнозирования ситуации с функционированием транспортной системы является информация о дорожно-транспортных происшествиях и ремонте участков улично-дорожной сети.

Для хранения и обработки натуральных данных, полученных с датчиков, а также расчета краткосрочных прогнозов на транспортной модели города используются соответствующие программные модули – PTV TrafficCountManagement и PTV Optima.

PTV TrafficCountManagement – программный продукт, являющийся профессиональной системой для хранения, обработки, анализа и управления натурными данными (значения интенсивности транспортных потоков, скорости транспортных потоков, масса проезжающих транспортных средств). Данная система позволяет хранить и обрабатывать данные из разных источников, в том числе различных форматов детекторов, а также возможен ввод данных вручную.

PTV Optima – программный продукт, который позволяет выполнять прогнозирование ситуации с функционированием транспортной системы в максимально оперативном режиме, использующий постоянно обновляющиеся данные с детекторов в режиме реального времени.

Оба программных модуля интегрируются в прогнозную транспортную модель, выполненную средствами PTV Vision ®Visum.

Интегрированная система на основе данных, получаемых с помощью системы управления и мониторинга дорожного движения (АСУДД) и транспортной модели с возможностью выполнения краткосрочного прогнозирования ситуации с функционированием транспортной системы, станет полноценной интеллектуальной транспортной системой, которая позволит принимать управленческие решения по оперативному управлению дорожным движением.

Внедрение системы позволит минимизировать последствия нештатного функционирования транспортной системы города (что может быть связано с ДТП, ремонтными работами и закрытием движения на отдельных участках УДС).

Принятые на ее основе управленческие решения в сфере управления и регулирования дорожного движения позволят значительно снизить негативные временные последствия возникновения типичных нештатных ситуаций.

Приложения

Приложение 1

**Методика сбора данных о суточной интенсивности
транспортных и пешеходных потоков**

Приложение 2

**Методика сбора данных о пассажирообороте
на остановочных пунктах городского
пассажирского транспорта общего пользования**

Приложение 3

**Методические указания по сбору данных
о работе светофорных объектов**

Приложение 1

Методика сбора данных о суточной интенсивности транспортных и пешеходных потоков

1. Место проведения замеров

Место проведения замеров указано на индивидуальной схеме участка обследования, выдаваемой каждому оператору. Масштаб схемы указан в левом нижнем углу. Верх листа соответствует направлению на север.

2. Время проведения замеров

Замеры производятся в соответствии со временем, указанным в контрольной карте.

3. Дислокация операторов

Оператор находится в непосредственной близости от перекрестка на удалении не менее 50 см от края проезжей части.

4. Снимаемые показатели

Количество автомобилей (ед.), въезжающих на перекресток с каждого направления за 5 минут в каждом получасовом интервале, в том числе:

Легковые автомобили:

- легковые автомобили (категория В) – автомобили, разрешенная максимальная масса которых не превышает 3500 кг и число сидячих мест которых, помимо сиденья водителя, не превышает восьми (в том числе ИЖ-2715, УАЗ-3101, УАЗ-2206);

- мотоциклы – также следует относить к категории легковых автомобилей.

Грузовые автомобили:

– грузовые автомобили (категория С, Е) – автомобили, разрешенная максимальная масса которых превышает 3500 кг.

– «Газели», где количество сидячих мест меньше либо равно восьми, относятся к грузовому транспорту;

Общественный транспорт:

– автобусы, троллейбусы, трамваи и «Газели», где количество сидячих мест превышает восемь.

Регистрируются:

- Количество автомобилей, движущихся через перекресток в различных направлениях.

- Количество пешеходов, переходящих проезжую часть, с каждого направления за 5 минут в каждом полчасовом интервале.

5. Порядок проведения замеров

В течение каждого получаса оператор выполняет следующие действия:

- 1) занимает позицию, удобную для визуального наблюдения за транспортными средствами, въезжающими на перекресток с направления I;

- 2) в течение 5 минут считает:

- а) количество транспортных средств, которые въезжают на перекресток с первого направления, отмечая их условными знаками на рабочем листе (например, легковые автомобили – | ; грузовые автомобили – Х ; общественный транспорт – О) по колонкам соответствующих направлений движения через перекресток;

- б) количество пешеходов, переходящих, проезжую часть с направления I по обе стороны дороги.

- 3) переходит проезжую часть и повторяет пункты 1 и 2 для направления II;

- 4) переходит проезжую часть и повторяет пункты 1 и 2 для направления III;

- 5) переходит проезжую часть и повторяет пункты 1 и 2 для направления IV;

- 6) заполняет контрольную карту;

В начале следующей половины часа оператор размечает новый рабочий лист и начинает следующий замер, повторяя пункты 1 – 6.

6. Порядок заполнения контрольной карты

- 1) В верхней части контрольной карты обязательно указываются фамилия, инициалы оператора, номер исследуемого перекрестка, число и день недели проведения замера.

2) На индивидуальной схеме участка обследования указана нумерация направлений, которой необходимо строго придерживаться при заполнении контрольной карты.

3) При заполнении столбца «Количество автомобилей, въезжающих на перекресток» оператор сначала подсчитывает число условных знаков | (легковые автомобили, въехавшие на перекресток) с направления I и вписывает полученное число (без умножения на 6) в соответствующую ячейку. Затем подсчитывает число знаков X (грузовые автомобили) и O (общественный транспорт) и также вписывает в соответствующие ячейки.

Для остальных направлений действия те же.

4) При заполнении столбца «Количество автомобилей, поворачивающих в направлении...» для направления I оператор сначала подсчитывает число всех знаков в столбце рабочего листа, соответствующего движению автомобиля в направлении II, записывает это число в соответствующую ячейку контрольной карты. Затем подсчитывает число всех знаков в столбце, соответствующем движению автомобилей в направлении III, записывает это число в контрольную карту. То же для автомобилей, движущихся в направлении IV.

Для остальных направлений въезда на перекресток столбцы заполняются аналогично.

5) В столбце «Количество пешеходов» оператор указывает число пешеходов, переходящих, проезжую часть по обе стороны дороги, с каждого направления за 5 минут.

7. Техника безопасности

При проведении замеров оператор должен выполнять следующие меры безопасности:

- Неукоснительно соблюдать Правила дорожного движения.
- Место наблюдения выбирать так, чтобы не создавать помех движению транспорта и пешеходов.
- На месте проведения замера необходимо находиться в светоотражающем жилете.

Далее приведены «Образец рабочего листа для сбора данных о суточной интенсивностей транспортных и пешеходных потоков» и «Контрольная карта для сбора данных о суточной интенсивности транспортных и пешеходных потоков».

Таблица П.1

Образец рабочего листа для сбора данных о суточной интенсивностях транспортных и пешеходных потоков

№ перекрестка	Время замера	Образец рабочего листа			
		с I-го направления движется в сторону:		со II-го направления движется в сторону:	
II-го направления	III-го направления	пешеходы	IV-го направления	III-го направления	IV-го направления

с IV-го направления движения движется в сторону:				с III-го направления движения движется в сторону:			
I-го направления	II-го направления	пешеходы	III-го направления	IV-го направления	I-го направления	пешеходы	II-го направления
— легковые автомобили				О — автобусы, троллейбусы, трамваи			

Контрольная карта для сбора данных о суточной

Фамилия И.О. оператора								№ перекрестка
Характеристики напряженности транспортных потоков								
направления въезда на перекресток								
№	время	с I направления						
		кол-во а/м, въезжающих на перекресток			кол-во а/м, поворачивающих в направлении:			кол-во пешеходов
		ЛА	ГА	ОТ	II	III	IV	
1	7:00							
2	7:30							
3	8:00							
4	8:30							
5	9:00							
6	9:30							
7	10:00							
8	10:30							
9	11:00							
10	11:30							
11	12:00							
12	12:30							
13	13:00							
направления въезда на перекресток								
№	время	с IV направления						
		кол-во а/м, въезжающих на перекресток			кол-во а/м, поворачивающих в направлении:			кол-во пешеходов
		ЛА	ГА	ОТ	I	II	III	
1	7:00							
2	7:30							
3	8:00							
4	8:30							
5	9:00							
6	9:30							
7	10:00							
8	10:30							
9	11:00							
10	11:30							
11	12:00							
12	12:30							
13	13:00							

Приложение 2

Методика сбора данных о пассажирообороте на остановочных пунктах городского пассажирского транспорта общего пользования

1. Место проведения замеров

Место проведения замеров находится на остановке общественного транспорта, название и местоположение которой указано на карте, выданной оператору при получении задания.

Время проведения замеров: в начале каждого часа, первая смена – с 7-00 до 13-00, вторая смена – с 14-00 до 21-00.

2. Снимаемые показатели

Наполненность салона прибывшего общественного транспорта, число выходящих и входящих пассажиров для маршрутов, указанных на карте, выдаваемой оператору.

3. Порядок проведения замеров

1. В начале часа оператор занимает на остановке позицию, максимально удобную для визуального наблюдения за подъезжающим общественным транспортом и ожидающими транспорт пассажирами.

2. При прибытии на остановку общественного транспорта оператор заносит данные в соответствующие ячейки контрольной карты, после чего ждет следующую единицу общественного транспорта.

3. По истечении часа оператор переходит на следующий пункт остановки.

4. Порядок заполнения контрольной карты.

1. В верхней части контрольной карты обязательно указываются фамилия, инициалы оператора, номер и название исследуемой остановки, число и день недели проведения замера.

2. При прибытии на остановку единицы общественного транспорта оператор последовательно заполняет строки таблицы:

- а) время прибытия единицы ОТ
- б) номер маршрута ОТ
- в) вид общественного транспорта (трамвай – тм, троллейбус – тб, автобус – авт, газель)
- г) для автобусов записать тип (1 – МВ, МАН, 2 – ПАЗ, 3 – ЛиАЗ, НефАЗ)
- д) для всех видов необходимо записать, одиночная это транспортная единица или сочлененная (автобус, троллейбус с «гармошкой», для трамвая – двухвагонный), обозначить: одиночная единица – 1, сочлененная единица – 2.
- е) оценить степень наполнения салона транспортного средства по 6-балльной шкале (до прибытия на остановку)

6 – предельное наполнение салона, не видно просветов между людьми, посадка пассажиров невозможна или возможна в малом количестве

5 – все места для сидения заняты, много стоящих людей, но есть просветы между людьми

3 – все места для сидения заняты, стоящих людей достаточно много

4 – места для сидения полностью заняты, стоящих пассажиров очень мало

2 – занято от 1/3 до 2/3 мест для сидения

1 – занято не более 1/3 мест для сидения

ж) количество вышедших на остановке пассажиров

з) количество вошедших на остановке пассажиров

3. После внесения данных оператор ожидает следующую единицу ОТ.

4. В случае если единица ОТ проехала мимо остановочного пункта, сломалась около него, не открыла двери, а также в случаях других непредвиденных ситуаций, заполняются все поля, которые возможно заполнить.

Далее представлен образец контрольной карты для сбора данных о пассажирообороте на остановочных пунктах ГПТОП.

Приложение 3

Методические указания по сбору данных о работе светофорных объектов

1. Цель работы

Обследование режимов работы светофорных объектов.

2. Задачи

- Создать схему работы светофорного объекта на перекрестке
- Определить фазы работы светофорного объекта
- Определить время горения сигналов для каждой группы сигналов на перекрестке.

3. Необходимые принадлежности

- Инструкция;
- Бланки для учета режимов работы светофорных объектов;
- Секундомер;
- Ручка или карандаш.

4. Описание колонок таблицы

Такт – количество переключений светосигнальной установки в течение цикла.

Время, с – координаты по времени переключения сигналов.

Длительность, с – интервалы горения сигнала в такте.

Фазы – стадии горения светосигнальных установок по направления движения.

1, 2, 3, ... – нумерация транспортных и пешеходных потоков.

5. Указания

1. Добраться до нужного перекрестка со светофорным объектом.

2. Выбрать бланк с нужной конфигурацией перекрестка из предложенных вариантов, если таковая имеется, или нарисовать схему вручную на бланке с пустой таблицей.

3. На выбранной схеме подписать пересекающиеся улицы.

4. В верхней части бланка указать название перекрестка.

5. Из наблюдений на перекрестке установить, в какое количество фаз происходит работа светофора (в примере ниже светосигнальная установка на Х-образном перекрестке работает в 2-фазном режиме: 1 фаза – главный поток, 2 фаза – второстепенный поток).

6. Если светофорный объект имеет отдельную секцию на поворот «Направо» или «Налево», то нужно указать ее в конфигурации светофора.

7. Определить и нанести на схемах все транспортные и пешеходные потоки **по фазам** горения светосигнальной установки. Вначале обозначаются транспортные потоки, далее пешеходные.

8. В первом столбце напротив цифр поставить букву, соответствующую потоку: Т – транспортный, П – пешеходный.

9. Далее оператор должен вставать на каждом въезде на перекресток и при помощи секундомера замерять длительность горения сигналов для каждого такта горения светосигнальной установки. Полученные данные в соответствии с планом времени следует занести в строки «Время» и «Длительность» таблицы.

10. В помощь оператору на перекрестках установлены таймеры обратного отсчета переключения сигналов, данные с которых можно заносить в таблицу.

11. В строке «Фазы» следует указать нумерацию фаз переключения сигналов в соответствии со схемами.

12. В строках «1, 2, 3, 4, ...» следует обозначить цвет горения такта:

З – зеленый;

Ж – желтый;

К – красный;

ЗМ – мигание зеленого сигнала.

13. После внесения всех данных в таблицу нужно определить время полного цикла и занести в поле «Время полного цикла».

14. Осуществить переход на следующий перекресток со светосигнальной установкой.

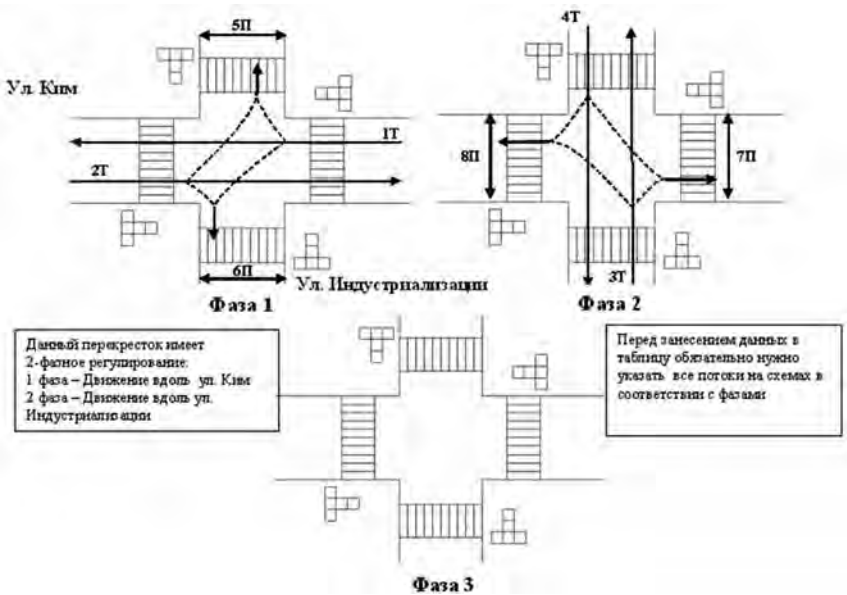
В качестве примера ниже приводятся два образца заполнения (1 и 2) бланков – для Х-образного и Т-образного перекрестков. Особое внимание стоит обратить на Т-образный перекресток, светофорное регулирование которого осуществляется в 3 фазы.

Также представлены образцы выполнения исследования для различных видов перекрестков со светофорным регулированием (Образцы 3–7).

Образец заполнения 1

Х-образный перекресток

Перекресток: ул. Ким – ул. Индустриализации



Таблица

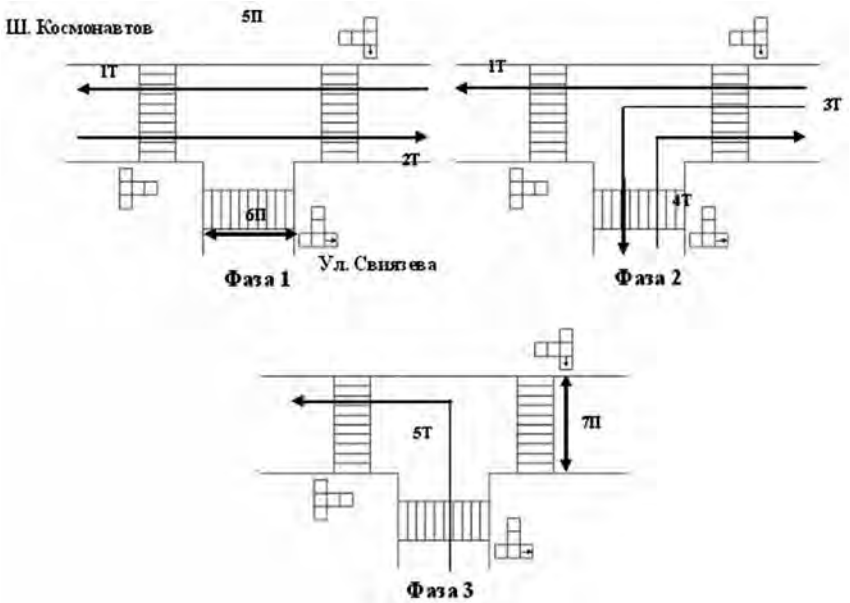
Цикл		Рабочий									
Такт		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время, с		0	32	35	38	50	53				
Длительность		32	3	3	12	3	3				
Фазы		Ф1	>>	>>	Ф2	>>	>>				
1	Т	З	ЗМ	Ж	К	К	К				
2	Т	З	ЗМ	Ж	К	К	К				
3	Т	К	К	К	З	ЗМ	Ж				
4	Т	К	К	К	З	ЗМ	Ж				
5	П	З	ЗМ	Ж	К	К	К				
6	П	З	ЗМ	Ж	К	К	К				
7	П	К	К	К	З	ЗМ	Ж				
8	П	К	К	К	З	ЗМ	Ж				
9											
10											

Время полного цикла: 56 с

Образец заполнения 2

Т-образный перекресток

Перекресток: шоссе Космонавтов – ул. Связьева



Таблица

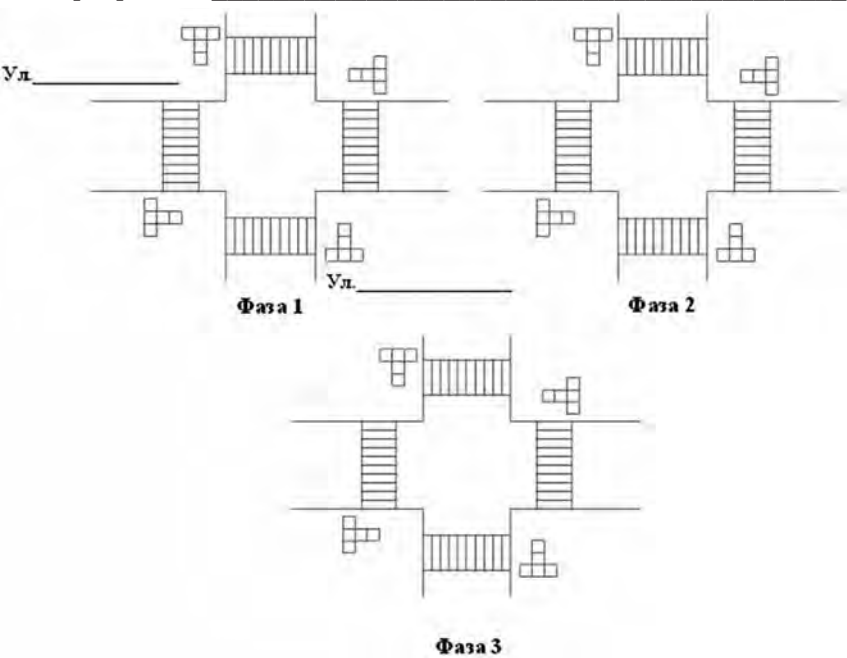
Цикл		Рабочий									
Такт		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время, с		0	20	23	26	36	39	42	45	48	
Длительность		20	3	3	10	3	3	13	3	3	
Фазы		Ф1	>>	>>	Ф2	>>	>>	Ф3	>>	>>	
1	Т	З	З	З	З	ЗМ	Ж	К	К	К	
2	Т	З	ЗМ	Ж	К	К	К	К	К	К	
3	Т	К	К	К	З	ЗМ	Ж	К	К	К	
4	Т	К	К	К	З	ЗМ	Ж	К	К	К	
5	Т	К	К	К	К	К	К	З	ЗМ	Ж	
6	П	З	ЗМ	Ж	К	К	К	К	К	К	
7	П	К	К	К	К	К	К	З	ЗМ	Ж	
8											
9											
10											

Время полного цикла: 51 с

Образец 3

Х-образный перекресток

Перекресток: _____



Таблица

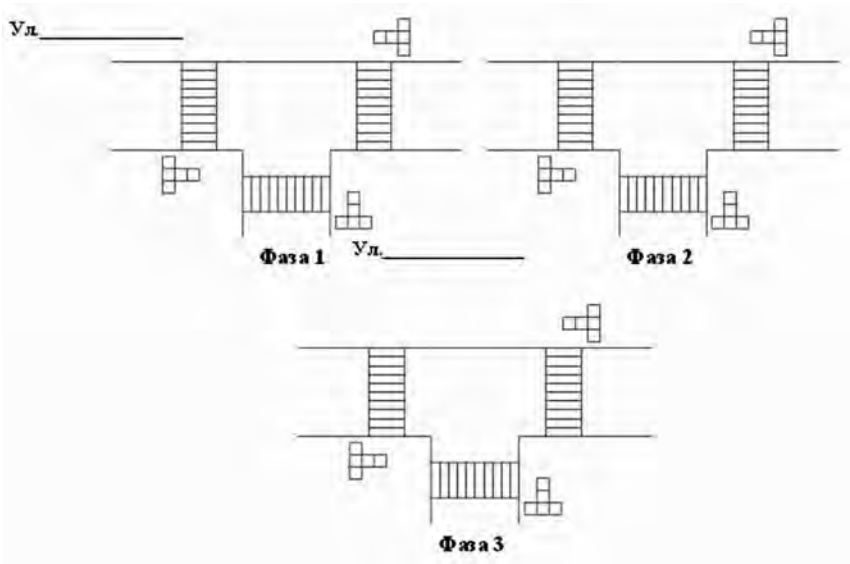
Цикл		Рабочий									
Такт		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время, с											
Длительность											
Фазы											
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

Время полного цикла: ____ с

Образец 4

Т-образный перекресток

Перекресток: _____



Таблица

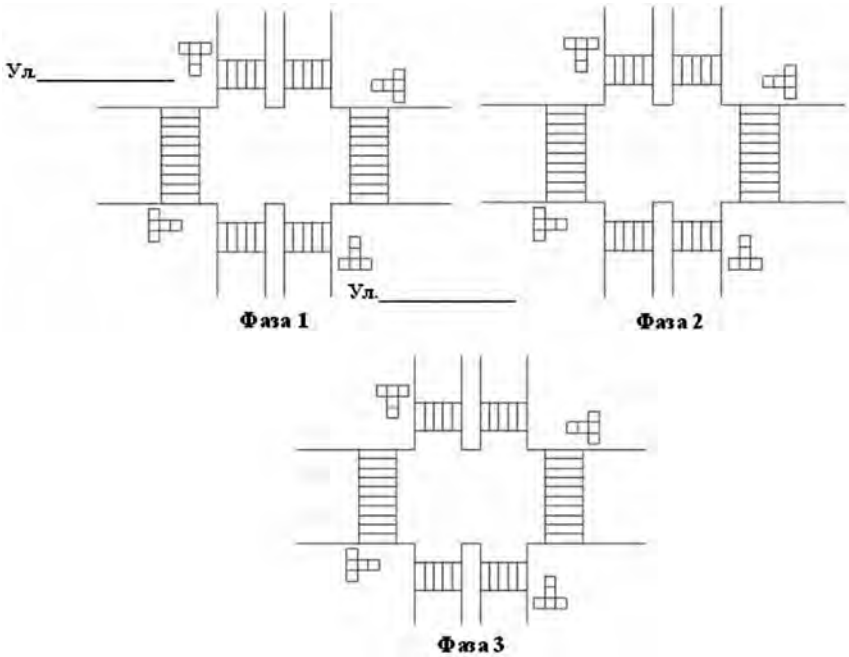
Цикл		Рабочий									
Такт		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время, с											
Длительность											
Фазы											
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

Время полного цикла: ____ с

Образец 5

Х-образный перекресток с разделенной проезжей частью

Перекресток: _____



Таблица

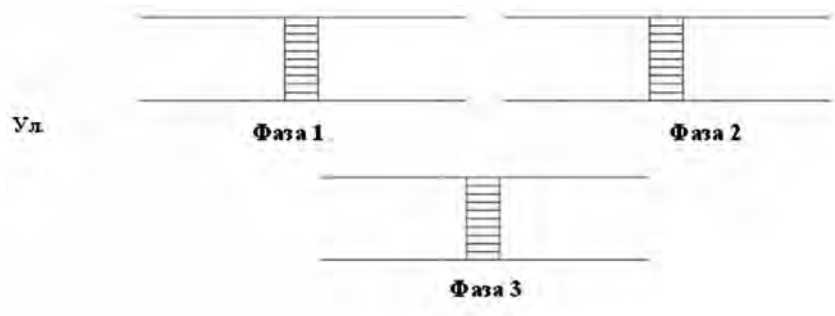
Цикл		Рабочий									
Такт		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время, с											
Длительность											
Фазы											
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

Время полного цикла: ____ с

Образец 6

Отдельный светофор для пешеходов

Перекресток: _____



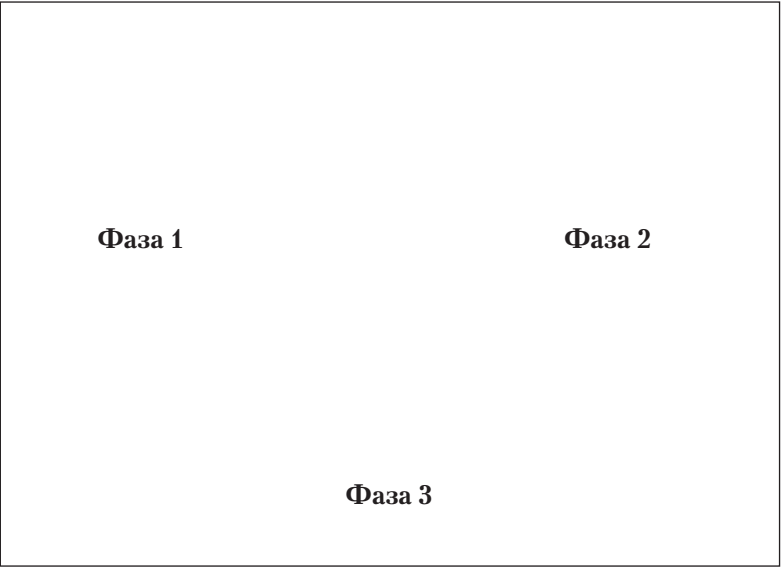
Таблица

Цикл		Рабочий									
Такт		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время, с											
Длительность											
Фазы											
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

Время полного цикла: ____ с

Образец 7

Перекресток: _____



Таблица

Цикл		Рабочий									
Такт		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время, с											
Длительность											
Фазы											
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

Время полного цикла: ____ с

Заключение

Представленный труд ни в коей мере не претендует на изложение некоего нового направления в транспортном моделировании. Вопросы сбора, анализа и обработки исходных данных для построения транспортных моделей, как и вопросы построения основных определяющих соотношений для последующего прогнозирования не раз находили свое отражение в работах зарубежных авторов и в статьях отечественных исследователей.

Представляется, что ценность предлагаемой книги проявляется в первую очередь в последовательном изложении методики и отчасти технологии построения транспортных моделей. Представлены научно-методические основы построения прогнозных математических моделей транспортного спроса и транспортного предложения в крупных городах.

Исследование особенностей разработки и последующей актуализации транспортных моделей позволило сформировать стройную и последовательную стратегию их создания, которая обладает самостоятельной научной ценностью. Предложенная структурная схема решения задачи построения прогнозной транспортной модели позволила связать отдельные шаги алгоритма расчета модели, массивы необходимых исходных данных и набор определяющих соотношений в единый процесс, позволяющий исследователю самостоятельно и с минимальными затратами создавать транспортные модели современных городов.

С другой стороны, читателю, не посвященному в вопросы транспортного моделирования, книга поможет сформировать целостное представление о назначении, видах и основных прикладных задачах, решаемых при помощи транспортных моделей.

Список литературы

1. Большой энциклопедический словарь иностранных слов / Сост. А.Ю. Москвин. – М.: ЗАО Издательство Центрполиграф: ООО «Полус», 2003. 816 с.
2. *Стрельников А.И.* Моделирование транспортных систем на начальных стадиях градостроительного проектирования. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1978.
3. *Канторович Л.В., Горстко А.Б.* Оптимальные решения в экономике. – М.: Наука, 1972. 231 с.
4. Линейное и нелинейное программирование: Учебное пособие / И.Н. Ляшенко, Е.А. Карагодова [и др.]; под общ. ред. И.Н. Ляшенко. – Киев: Вища школа, 1975. 372 с.
5. *Михайлов А.Ю., Головных И.М.* Модель оценки пропускной способности улично-дорожной сети // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: Сб. докл. 5-я междунар. конф. – СПб.: СПбГАСУ, 2002. С. 229–231.
6. *Швецов В.И.* Математическое моделирование загрузки транспортных сетей / В.И. Швецов, А.С. Алиев. – М.: URSS, 2003. 64 с.
7. Математическое моделирование автотранспортных потоков на регулируемых дорогах / А.Б. Киселев, А.В. Кокорева [и др.] // Прикл. матем. и механ. (ПММ). – 2004. – Т. 68. – Вып. 6. – С. 1047–1054.
8. *Киселев А.Б., Кокорева А.В., Никитин В.Ф., Смирнов Н.Н.* Математическое моделирование движения двухполосного автотранспортного потока, регулируемого светофором / А.Б. Киселев, А.В. Кокорева [и др.] // Вестник Моск. ун-та. Сер. 1. Матем. Механ. – 2006. – № 4. – С. 35–40.
9. Математическое моделирование движения автотранспортных потоков методами механики сплошной среды. Исследование влияния искусственных дорожных неровностей на пропускную способность участка дороги / А.Б. Киселев, А.В. Кокорева [и др.] // Современные проблемы математики и механики. Том I. Прикладные исследования / под ред. В.В. Александрова и В.Б. Кудрявцева. – М.: Изд-во МГУ, 2009. С. 311–322.
10. *Якимов М.Р.* Анализ влияния различных сценариев развития транспортной системы крупного города на возможные варианты нарушения целостности городской структуры // Вестник транспорта Поволжья. – 2011. – № 1 (25). С. 18–24.

11. Трофименко Ю.В., Якимов М.Р. Методика оценки эффективности реализации транспортного спроса на урбанизированной территории // Транспорт Урала. 2010. – № 3. С. 34–39.
12. Якимов М.Р. Математическое моделирование распределения транспортного спроса в транспортной системе города // Транспорт: наука, техника, управление. 2010. – №10. С. 7–13.
13. Lohse D. Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 2: Verkehrsplanung, 2. Aufgabe, Berlin, Verlag für Bauwesen GmbH, 1997. 326 с.
14. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. Modeling Transport. John Wiley & Sons Ltd, 2001. 594 p.
15. Якимов М.Р. Общий алгоритм работы четырехшаговой транспортной модели // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – № 1 (48). С. 132–138.
16. Глик Ф.Г. Обследования к комплексным транспортным схемам городов Беларуси // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: науч. Материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Издательство АМБ, 2008. 294 с.
17. Канский Д.В., Рожанский Д.В. Разработка методики сбора исходных данных о параметрах транспортного потока. // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: науч. материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Издательство АМБ, 2007. 296 с.
18. Трофименко Ю.В., Якимов М.Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов: монография / Ю.В. Трофименко, М.Р. Якимов. – М.: Логос, 2013. 464 с.
19. Швецов В.И. Математическое моделирование загрузки транспортных сетей / В.И. Швецов, А.С. Алиев. – М.: URSS, 2003. 64 с.
20. Лозе Д. Моделирование транспортного предложения и спроса на транспорт для пассажирского и служебного транспорта – Обзор теории моделирования. Источник электронного доступа: <http://www.ptv-vision.ru/assets/Uploads/data/publication-Lohse-Obsor-teorii-modelirovaniya.pdf>
21. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: Учебное пособие / А.В. Гасников и др. Под ред. А.В. Гасникова. – М.: МЦНМО, 2012. 376 с.
22. Schiller C. (2004): Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung. Schriftenreihe des Institutes für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden, Heft 8/2004, Dresden.
23. Schiller C. (2009): Erweiterung der Verkehrsnachfragemodellierung um Aspekte der Raum- und Infrastrukturplanung – Chancen für eine integrierte Stadt- und Verkehrsplanung (2009). In Tagungsband AMUS 2009, RWTH Aachen, Aachen
24. Якимов М.Р. Транспортные системы крупных городов. – Пермь: Издательство ПГТУ, 2008. 184 с.
25. Михайлов А.Ю. Восстановление матриц корреспонденций на основе данных интенсивности движения / Сб. обзорной информации: Транспорт. Наука, техника, управление. – М.: ВИНТИ, 2003. – № 7. С. 30–34.
26. Петров В.Ю., Петухов М.Ю., Якимов М.Р. Анализ режимов работы улично-дорожной сети г. Перми. – Пермь: ПГТУ, 2004.

27. Петров В.Ю., Якимов М.Р. Геоинформационная система по эксплуатации и развитию транспортного комплекса региона / Научные разработки и изобретения Пермского государственного технического университета: реферативный сборник. – Пермь: ПГТУ, 2003.

28. Якимов М.Р. Концепция транспортного планирования и организации движения в крупных городах: монография / М.Р. Якимов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. 175 с.

29. Якимов М.Р. Научная методология формирования эффективной транспортной системы крупного города. Дисс. ... доктора технических наук. М.: МАДИ (ГТУ), 2012.

Научное издание

Михаил Ростиславович Якимов

ТРАНСПОРТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ:
создание транспортных моделей городов

Монография

Редактор *Л.Б. Вахитова*
Корректор *Ю.В. Халфина*
Компьютерная верстка *Ю.В. Халфиной*
Оформление *А.В. Ероховой*

Подписано в печать 28.04.2013. Формат 60×90/16.
Печать офсетная. Печ. л. 11,75.
Тираж 300 экз. Заказ №

Издательская группа «Логос»
111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 55, корп. 31

Электронная почта: universitas@mail.ru
Дополнительная информация на сайте <http://www.logos.ru>

Отпечатано с готового оригинал-макета